

# Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana

Pequeñas subvenciones a la innovación del FONDO DE ADAPTACIÓN



Acción, Innovación - Aprender y Compartir.



ADAPTATION FUND



IDDI

Appendix I.- Inception Report

## Inception Phase – Project Presentation and meetings



“Strengthening a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climatechange adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo Solar Desalination appropriate technology”

INNOVATION SMALL GRANTS – ADAPTATION FUND



IDDI



ADAPTATION FUND

“Strengthening a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climate change adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo Solar Desalination appropriate technology”

### Program Management Unit Meeting

<b>David Luther</b>	Executive Director IDDI ( <b>President</b> )
<b>Teresa Disla</b>	Focal Point, Ministry of Environment, – <b>PMU Secretary</b>
<b>Esther Reyes</b>	Focal Point, INAPA
<b>Arcadia Francisco</b>	Project Coordinator Enhancing resilience San Cristobal AF/IDDI
<b>Rosa Damaris Mejia</b>	Project Coordinator Innovation Project AF/IDDI
<b>Pedro Zuccarini</b>	Planning Director

“Strengthening a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climate change adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo Solar Desalination appropriate technology”

Program Management Unit Meeting  
Date: 11/3/2021  
Auditorium IDDI



#### Agenda

1

09:00-09:15 a.m.	Welcome address by the Executive Director
09:15-10:15 a.m.	Presentation of the agenda and project summary
10:15-11:00 a.m.	Review of the Work Plan and assignment of duties
11:00-12:00 p.m.	Review of Roadmap and implementation dates
12:00-12:30 p.m.	Next steps



“Strengthening a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climate change adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo Solar Desalination appropriate technology”

## Presentation of the project to local stakeholders in Montecristi Province.

Fecha: 16/4/2021  
Club Nautico - Montecristi



10:00-10:15 a.m.	Palabras de Bienvenida Gobernadora de Montecristi
10:15-10:30 a.m.	Presentacion de Participantes
10:30-11:00 a.m.	Presentacion del Proyecto Desalinizacion Termosolar objetivos y alcances - Alvaro Atilano
11:00-12:00 p.m.	Participacion comunitaria y proximos pasos.

Participante	Institución
Nelsy Milagros Cruz	Gobernadora de la Provincia de Montecristi
Jesus Jerez	Alcalde del Ayuntamiento de San Fernando de Montecristi
Rafael Socia	Director Provincial Ministerio del Ambiente
David Luther	Director Ejecutivo IDDI
Rosa Damaris Mejia	Coordinadora del Proyecto Termosolar
Arcadia Francisco	Coordinadora PMU IDDI
Pedro Zuccarini	Dirección de Planificación IDDI
Frederick Payton	Director Ejecutivo AgroFrontera
CarlosThen	CODOPESCA
Miguel Ángel Sabala	Salineros Montecristi
Jeniffer Molina Tavárez	Salineros Montecristi
Soraya Rodriguez	Auxiliares Navales
Alvaro Atilano	Tecnologías TermoSolares 2021 SRL
Jorge Marichal	Ministerio de Turismo
Dario Valentin	Comunidad de Caño Yuti
Juan Tejada	Comunidad de Marigot



Authorities of the Province of Montecristi, local actors and representatives of salt workers.



“Strengthening a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climate change adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo Solar Desalination appropriate technology”

Presentation of the project at the Ministry of Environment (Vice Ministry of International Cooperation).



For the Ministry of Environment: Vice Minister Milagros de Camps, Director of Climate Change, Nataly Flores, IDDI Executive Director, David Luther

Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana

Pequeñas subvenciones a la innovación del FONDO DE ADAPTACIÓN



Acción, Innovación - Aprender y Compartir.



ADAPTATION FUND



IDDI

Appendix II.- Key Project Staff List



## INSTITUTO DOMINICANO DE DESARROLLO INTEGRAL (IDDI)

David Luther : Director del Proyecto

### Equipo Técnico:

Rosa Damaris Mejia: Coordinadora del Proyecto

Técnicos:

Maximino Herrera

Elizabeth Regalado

Kendy Peña

### Equipo Administrativo:

Arelis Fermin: Directora Financiera

### Colaboradores:

Frederick Payton (Agrofrontera (Provincia de Montecristi))



## TECNOLOGIAS TERMOSILARES S.R.L

Alvaro Atilano (Gerente de Proyectos)

## INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SANTO DOMINGO

### Equipo Técnico:

Carlos Sanlley: Vice rector INTEC

Ulises Jáuregui-Haza: Director Técnico del Proyecto

### Técnicos para el diseño y construcción del prototipo

Pedro Disla

Juan E. Castellanos

Iván Jiménez

Deyslen Mariano

Kevin María

Randy Capellán

### Equipo Administrativo:

Manuel Santana





Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana

Pequeñas subvenciones a la innovación del FONDO DE ADAPTACIÓN



Acción, Innovación - Aprender y Compartir.



ADAPTATION FUND



IDDI

Appendix III.- Reports and evaluation of the Prototype by Dominican Universities

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SANTIAGO (UTESA)

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SANTO DOMINGO (INTEC)



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SANTIAGO**  
**UTESA**

**RESUMEN EJECUTIVO**  
**PRUEBA DEL PROTOTIPO TECNOLOGÍA PARA DESALACIÓN**  
**TERMOSOLAR**

**FACULTAD ARQUITECTURA E INGENIERIA**

**Informe:**

Resumen ejecutivo que muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al prototipo de una tecnología para desalación termosolar.

**Propósito:**

Comprobar el funcionamiento y la eficiencia del prototipo para desalación termosolar.

**Objetivos:**

- Obtener la mayor eficiencia posible en la evaporación del agua.
- Obtener la mayor eficiencia posible de condensación de vapor.

**Metodología:**

Para la consecución de los objetivos fueron realizadas las siguientes actividades

- Encendido de prototipo.
- Condicionar prototipo hasta conseguir valores deseados en las variables a controlar.
- Capturar datos en equipos de medición.
- Tabular datos.

- Análisis técnico de los datos.

Se realizaron pruebas en laboratorio bajo condiciones controladas para medir variables independientes tales como: Temperatura del aire en los ductos del equipo, temperatura del agua de entrada, temperatura del condensador, flujo de aire en los ductos, flujo de volumen agua de entrada y tiempo. Otras variables dependientes tomadas en consideración fueron: Humedad relativa, volumen de agua evaporada, volumen de vapor condensado, volumen de salmuera o su equivalente.

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de energía térmica C105 el cual se adapta a las condiciones de ensayo al prototipo. Fue considerada la normativa ISO 5725-1 correspondiente a la exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición.

Las pruebas fueron realizadas en un intervalo de una semana, en total 10 pruebas, cada una por periodos de una hora, con intervalos de captura de datos cada dos minutos.

**Responsables:**

Ing. José Rafael Díaz, M.S  
Director Ingeniería Mecánica  
Colegiatura (Codia): 4878

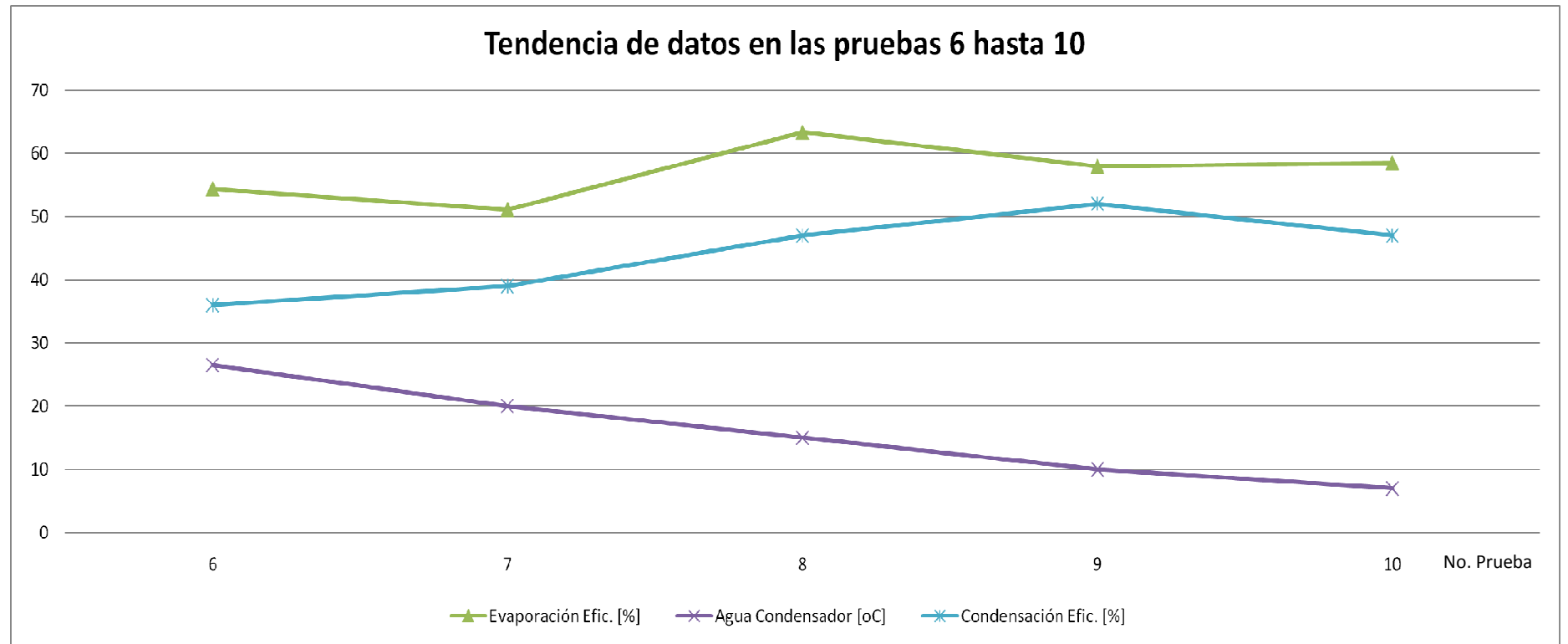
Ing. Raúl Alexis Toribio, M.S  
Director Ingeniería Electrónica  
Colegiatura (Codia): 23579

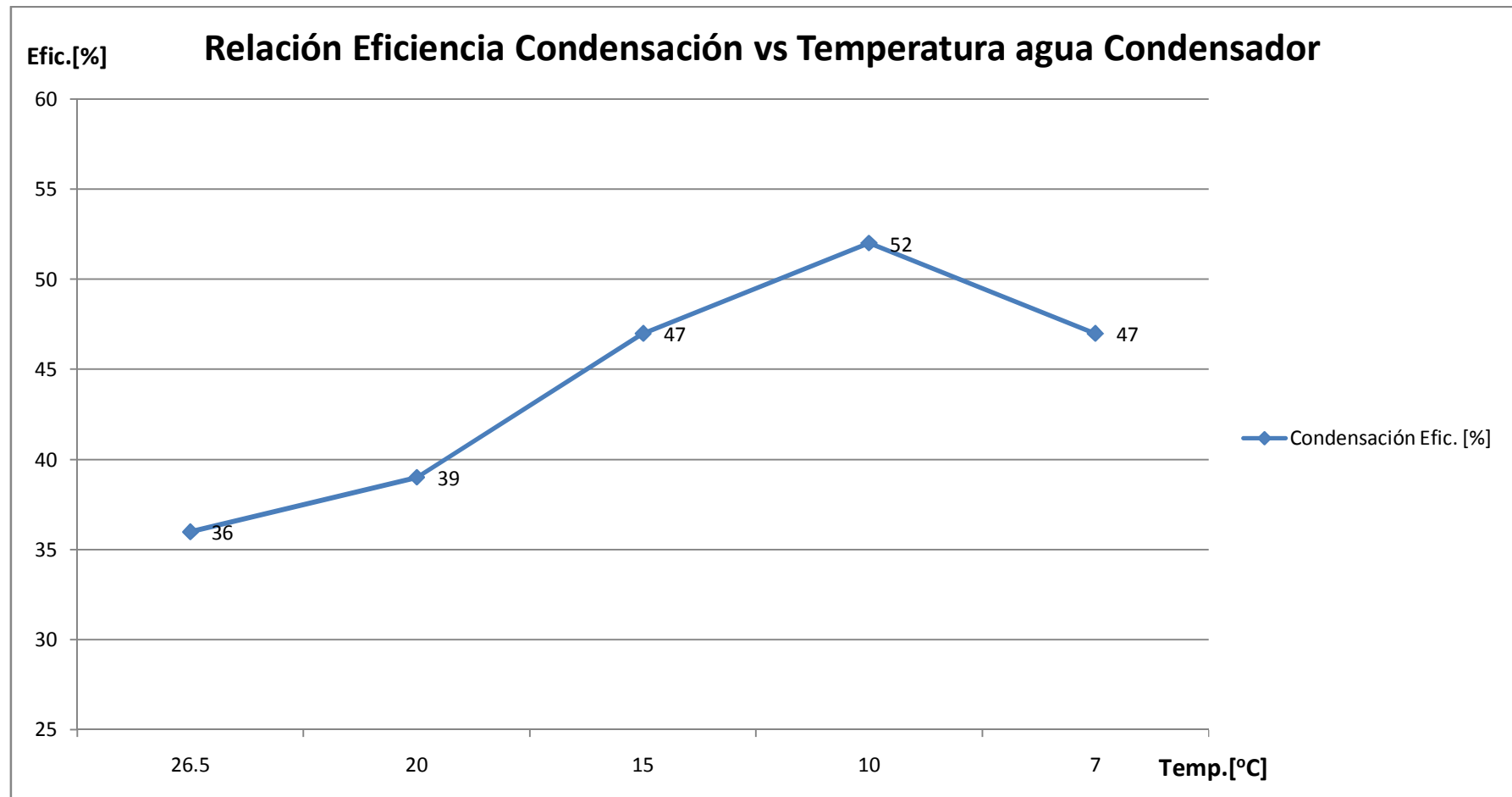
Samuel Isaac Pérez Espinal  
Estudiante Ingeniería Mecánica

Santiago, 09 de Marzo de 2022  
República Dominicana

1. SUMARIO DE PRUEBAS RESULTADOS								
Título		Pruebas realizadas en laboratorio al prototipo						
Tipo: Emisión								
No .	Tipo de prueba	Agua [L]	Salmuera o equivalente [L]	Evaporación [L]	Evaporación Efic. [%]	Condensación [L]	Agua Condensador [°C]	Condensación Efic. [%]
1		1.5	0.5	1	66.67	No se midió	No se midió	No se midió
2		4	2.72	1.29	32.12	No se midió	No se midió	No se midió
3		4.64	2.65	1.99	42.89	No se midió	No se midió	No se midió
4		4.4	2.38	1.96	45.16	0.410	26.5	21
5		4.22	2.33	1.89	44.79	0.444	26.5	23
6		4.38	2.00	2.38	54.34	0.85	26.5	36
7		5.07	2.48	2.59	51.08	1.00	20	39
8		3.00	1.00	1.90	63.33	0.90	15	47
9		4.78	2.01	2.77	57.95	1.45	10	52
10		4.43	1.84	2.59	58.47	1.21	7	47
	Notas:							
	Evaporización [%]							
	Promedio de evaporización: 51.68							







**Observación:** Con la condensación a 7 °C el flujo de aire a través del condensador fue muy bajo. De haberse aumentado el flujo de aire la proyección indicaba un rendimiento mayor que la prueba anterior.

## PRUEBA PROTOTIPO #1

### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 74°C y vertieron en promedio 1.5L de agua.

### Resultados:

Se obtuvo un 1L de agua evaporada y 0.5L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 66.67%.

### Nota:

En esta prueba no se condensó el vapor de agua.

### Fotografía:



## PRUEBA PROTOTIPO #2

### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y vertieron en promedio 4L de agua.

### Resultados:

Se obtuvo un 1.29L de agua evaporada y 2.72L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 32.12%.

### Nota:

En esta prueba no se condensó el vapor de agua.

### Fotografía:





### PRUEBA PROTOTIPO #3

#### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y vertieron en promedio 4.64L de agua.

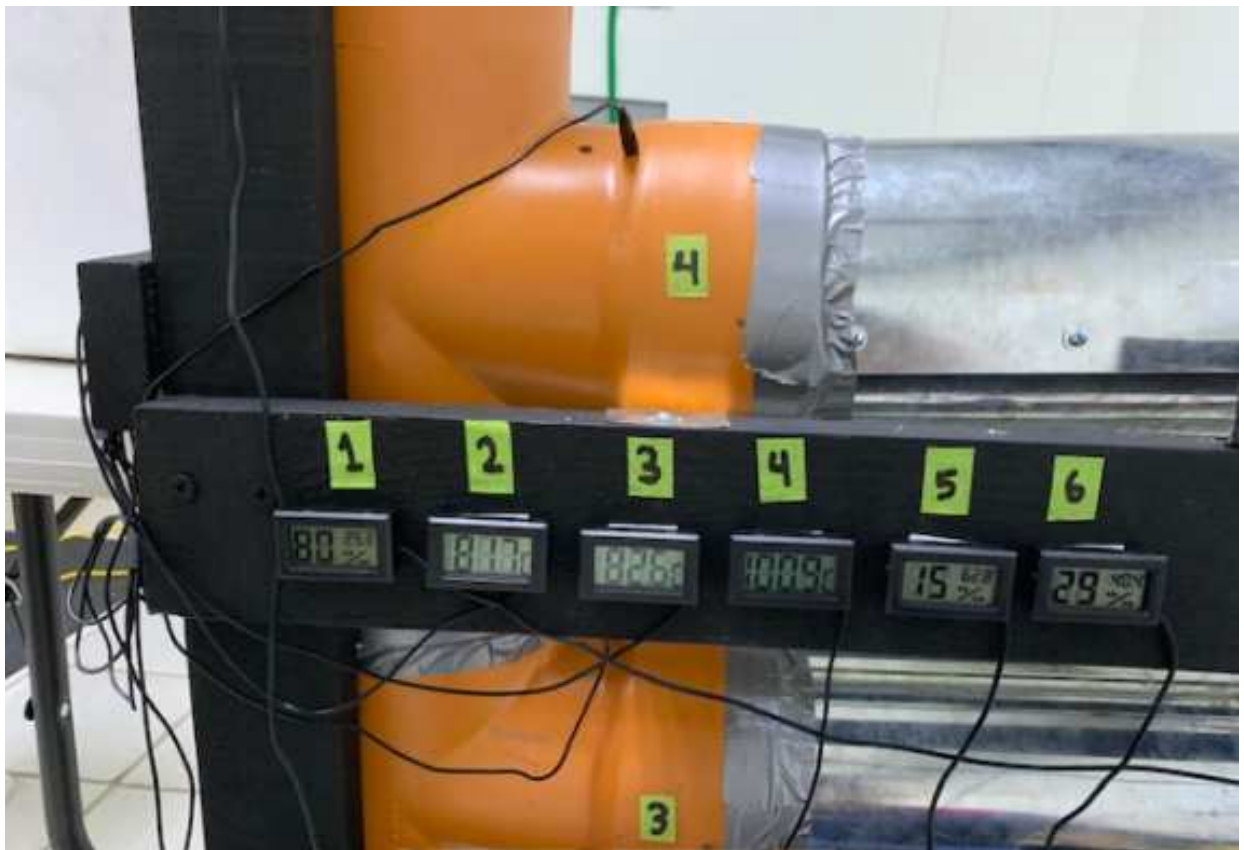
#### Resultados:

Se obtuvo un 1.99L de agua evaporada y 2.65L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 42.89%.

#### Nota:

En esta prueba no se condensó el vapor de agua.

#### Fotografía:



#### PRUEBA PROTOTIPO #4

##### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y vertieron en promedio 4.34L de agua.

##### Resultados:

Se obtuvo un 1.96L de agua evaporada y 2.38L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 45.16%. Se condensó 0.410L con una eficiencia de 21%.

##### Nota:

##### Fotografía:



## PRUEBA PROTOTIPO #5

### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y vertieron en promedio 4.22L de agua.

### Resultados:

Se obtuvo un 1.89L de agua evaporada y 2.33L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 44.79%. Se condensó 0.444L con una eficiencia de 23%.

### Nota:

### Fotografía:



## PRUEBA PROTOTIPO #6

### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y vertieron en promedio 4.38L de agua.

### Resultados:

Se obtuvo un 2.38L de agua evaporada y 2.00L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 54.34%. Se condensó 0.85L con una eficiencia de 36%.

### Nota:

### Fotografía:





### PRUEBA PROTOTIPO #7

#### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y agua del condensador a 20°C. Se vertieron en promedio 5.07L de agua.

#### Resultados:

Se obtuvo un 2.59L de agua evaporada y 2.48L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 51.08%. Se condensó 1.00L con una eficiencia de 39%.

#### Nota:

#### Fotografía:



## PRUEBA PROTOTIPO #8

### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y agua del condensador a 15°C. Se vertieron en promedio 3.00L de agua.

### Resultados:

Se obtuvo un 1.90L de agua evaporada y 1.10L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 63.33%. Se condensó 0.90L con una eficiencia de 47%.

### Nota:

### Fotografía:



## PRUEBA PROTOTIPO #9

### Descripción de la prueba:

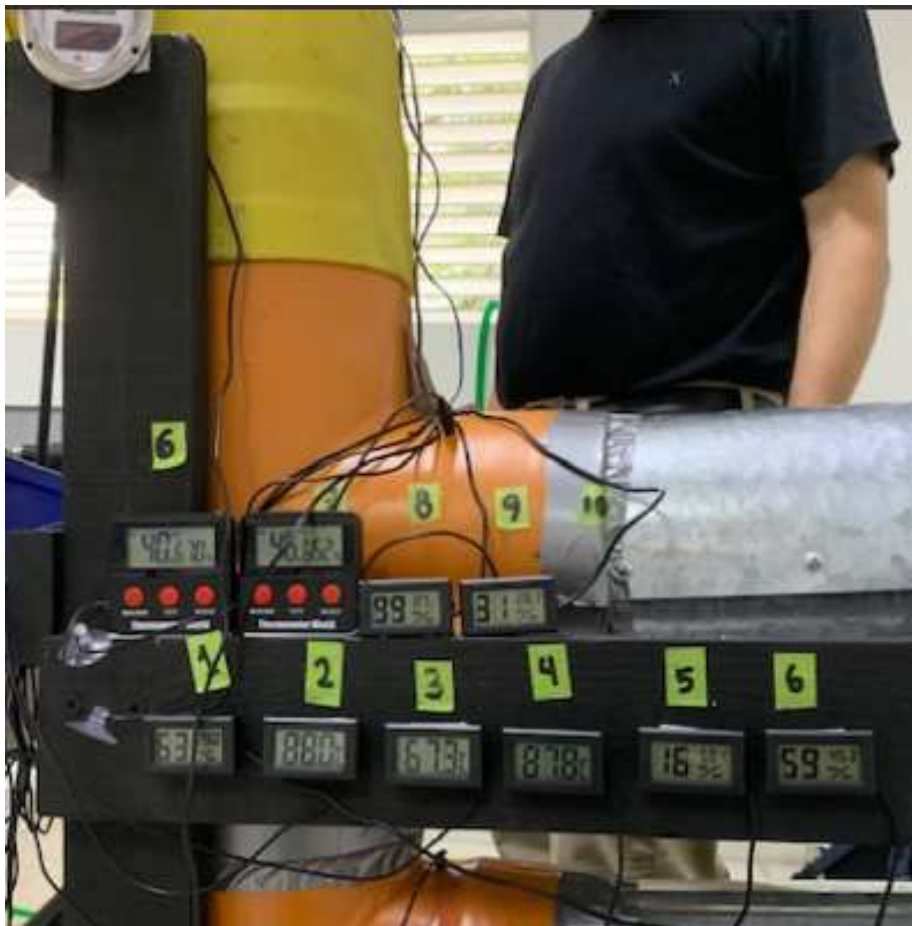
Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y agua del condensador a 10°C. Se vertieron en promedio 4.78L de agua.

### Resultados:

Se obtuvo un 2.77L de agua evaporada y 2.01L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 57.95%. Se condensó 1.45L con una eficiencia de 52%.

### Nota:

### Fotografía:



## PRUEBA PROTOTIPO #10

### Descripción de la prueba:

Esta se realizó con un aire de evaporación a 80°C y agua del condensador a 7°C. Se vertieron en promedio 4.43L de agua.

### Resultados:

Se obtuvo un 2.59L de agua evaporada y 1.84L de salmuera o su equivalente, con una eficiencia de evaporación del 58.47%. Se condensó 1.21L con una eficiencia de 47%.

### Nota:

### Fotografía:



## 2. INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN

Los equipos fueron calibrados de fábrica.

## 3. BIBLIOGRAFÍA

Yunes A Cengel y Michael A Boles. Termodinámica, Séptima Edición.

Van Wylen, Fundamentos de Termodinámica, sexta edición

Yunus A. Cengel (2011) Transferencia de calor y masa



## 4. ANEXOS

### RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #1

Prueba # 01 - Viernes 25 de febrero 2022

Prueba de la producción de vapor Agua y Salmuera o equivalente - Aire al Evaporador a 74 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor															Temperatura Agua de Entrada	
	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior	Evaporador Superior		Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador			
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]		H9 [%]
0	25.7	64	68	73.9	81.1	53.2	16	46.56667	36							75
2	25.8	62	74.2	75.9	73.3	53.3	16	46.36667	36							75
4	26.2	64	76.9	73.9	67.9	55.1	15	44.9	36							75
6	26.2	64	76.9	73.9	67.9	55.1	15	44.86667	36							75
8	26.5	64	75.1	80.2	78.7	56.6	14	45.43333	36							75
10	26.1	64	69.4	65.8	72	54.9	15	45.1	36							75
12	26.7	64	74.3	82.7	78	57.8	16	44.83333	36							75
14	26.6	65	85.8	78.6	76.3	58.7	16	44.8	39.66667							75
16	26.7	65	59.3	71.5	72	56.9	14	43.7	44.875							75
18	26.7	65	92.4	85.5	73.3	57.9	16	46.1	40.875							75
20	26.6	65	72.3	75.1	70.5	58.3	16	46.675	38.875							75
22	27	66	87.2	93.1	81.2	60.7	15	47.2	38.875							75
24	27	65	66.1	79.2	67.3	60.3	15	46.825	32.75							75
26	27	65	72.2	86.2	77.2	59.4	15	47.225	36.25							75
28	27.2	65	81.3	73.2	78	59.2	15	47.325	35.75							75
30	27.3	65	71.3	79.7	76.9	58.7	16	47.375	36.75							75
32	27.1	64	78.8	74.1	70.8	59.9	15	47.35	38							75
34	27.1	64	86.6	92	90.2	58.5	16	46.975	37.75							75
36	27	64	71.7	75.3	69	57.5	16	44.975	39.5							75
38	27.1	64	73.6	84.6	76.6	57.5	16	43.175	39.75							75
40	27.1	64	72.6	77.9	73.3	59.4	15	43.375	44.75							75
42	27.2	65	76.9	77.2	80.4	59.6	15	42.05	45.5							75
44	27.1	64	72.9	80.5	73	58.3	16	41.85	44.75							75
46	27	64	73.6	77.9	83.9	59	15	41.42	46.75							75
48	27	65	74.3	76.2	70.8	57.9	16	40.7	46							75
50	27.2	65	67.4	74.6	76.9	56.6	14	39.35	48							75
52	27.2	64	73.6	88	68.7	57.6	16	39.25	44.75							75
54	27.2	64	65	74.4	72.6	57.3	14	42.075	45.75							75
56	27.3	64	70.8	80.3	72.6	57	14	38.925	47							75

#### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	26.8	74.6	78.7	74.8	57.7	44.4				75.0
H [%]	64.4				15.3	40.2				

Agua [L]	1.500
Salmuera o equivalente [L]	0.500
Evaporación [L]	1.000 66.67%
Condensación [L]	0 0%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #2

Prueba # 02 - Sábado 26 de febrero 2022

Prueba de la producción de vapor Agua y Salmuera o equivalente- Aire al Evaporador a 80 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor

	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior		Evaporador Superior		Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	25	76	81.2	95.6	93.2	59.9	15	44	45.875							78.7
2	25	76	76.8	86.1	81.9	57.9	16	43.125	41							78.6
4	24.9	75	71.1	87.5	81.5	58.5	16	43.75	39.25							78.8
6	25.1	75	80.3	102.5	107.2	60.1	15	46.05	37							78.8
8	25	75	76.8	83.4	88.4	61.4	15	46	38							78.5
10	25.3	75	80.3	100	88	62.5	15	46.75	33.75							78.4
12	25.3	74	81.2	85.9	90.8	62.7	15	46.875	38.125							78
14	25.3	74	78.2	94.9	92.6	62.7	15	46.5	34.25							77.7
16	25.3	74	78.8	87.7	92	63.5	15	46.95	32.5							77.9
18	25.4	73	81.3	99.6	101.1	63.3	15	43.5	39.5							77.3
20	25.7	73	75.3	97.4	83	53.8	15	48.5	29.5							77.1
22	25.4	72	72.8	78.6	77.6	60.3	15	42.875	38							76.8
24	25.4	72	84.6	107.4	99.5	61.7	15	46.1	37							76.1
26	25.4	72	83.7	99.9	101.1	63	15	42.56667	42.75							75.9
28	25.5	71	88.3	89.7	86.9	64.4	15	43.15	45.75							75.8
30	25.7	72	85.7	100.7	95.9	65.5	15	43.6	46.5							78.5
32	25.7	71	86.4	92.7	86.5	66.1	15	46.225	41.25							80
34	25.5	71	85.9	92.7	86.5	66.3	15	44.4	41.5							80
36	25.9	71	86.3	110	97.3	65.6	15	45.15	48.25							79.6
38	25.5	71	70.6	85.4	76.1	66.2	15	43	44.5							79.2
40	25.7	71	80.5	82.8	78.3	65.1	15	42.425	48.75							78.8
42	25.9	71	82.8	102.5	94.5	64.5	15	42.3	50.5							78.4
44	26	69	81.9	90.4	95.2	64.7	15	42.55	51							77.5
46	26	69	88.3	97.1	87.4	65.3	15	54.375	52.75							77.1
48	25.8	70	78.8	89.9	101.1	64.9	15	41.875	52.25							76.6
50	26	69	81.4	97.3	87.4	64.3	15	42.075	52							75.9
52	25.9	69	79.7	85	89.1	64.1	15	41.7	52.25							75.6
54	25.9	69	81.4	81.5	82.1	64	15	41.8	52.25							74.8
56	26.1	68	80.5	110	88	64	15	42	53							73.9
58	26.1	67	81.9	93.6	93.9	63.7	15	41.425	52.5							73.1

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	25.6	80.8	93.6	90.1	63.0	44.4				77.4
H [%]		71.8			15.1	43.7				

Agua [L]	4.000
Salmuera o Equivalente[L]	2.715
Evaporación [L]	1.285 32.13%
Condensación [L]	0 0%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #3

Prueba # 03 - Lunes 28 de febrero 2022

Prueba de la producción de vapor Agua y Salmuera o equivalente - Aire al Evaporador a 80 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor																
	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior		Evaporador Superior		Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	25.3	80	81.7	82.6	100.9	62.8	15	41.8	54.33							81.8
2	25.3	79	75	86.9	77.3	62.3	15	42.4	49.5							81.5
4	25.3	79	85.5	91.8	84.7	63	15	43.3	50.75							81.1
6	25.5	79	76.1	83	86.8	63.1	15	42.8	48							81.1
8	25.7	79	81.2	99.7	79.5	61.5	15	43.875	46.5							81.3
10	25.6	19	72	79.5	87.6	60.1	15	43.15	45.5							81.1
12	25.7	79	82.7	88.1	95.6	60.4	15	45.375	45.75							81.2
14	25.5	78	71.7	103.1	85.9	58.1	16	43.575	48.5							80.9
16	25.7	79	71.4	82.4	78.9	58.3	16	42.55	52.25							80.9
18	25.8	79	79.1	103.8	93.3	60.3	15	36.94	48.75							80.7
20	25.7	79	76.6	82.5	72.6	61	15	43.325	45.75							80.5
22	25.5	79	78	89	87.7	62.2	15	44.275	45.75							80.2
24	25.3	78	67.6	79	87	60.3	15	43.125	48							79.9
26	25.3	78	80	97.3	74.9	61.3	15	42.775	48.75							79.6
28	25.3	78	80.4	86.3	78.2	62.8	15	42.5	48							79.3
30	25.1	78	69	72.9	87.6	61.1	15	41.525	49.5							79.1
32	25.3	78	80.4	86.3	78.2	62.8	15	42.4575	47.75							78.5
34	25.1	78	69	72.9	87.6	61.1	15	41.525	49.5							78.3
36	25.1	77	80	67.4	61.1	59.9	15	40.2	52.75							77.9
38	25.3	77	79.6	100.1	86.8	63	15	42.8	51.75							77.5
40	25.3	77	70.8	95.4	81.6	59.1	15	41.85	50.5							77.2
42	25.3	77	83.9	90	82.9	63	15	41.9	52.25							76.9
44	25.3	76	67.4	67.7	89.2	61	15	42.025	50.25							76.5
46	25.3	76	83	89	78	62.1	15	43.35	52.25							76
48	25.5	76	76.1	84.2	82.5	65	15	43.65	48.25							75.7
50	25.5	76	83.5	89.2	81.1	64.7	15	44.2	48							75
52	25.5	76	71.7	77.5	73.3	63.6	25	42.625	48							75.1
54	25.5	76	70.5	101.6	85.9	61.7	15	44.225	45							74.7
56	25.5	76	69.6	87.7	789	58.1	16	42.325	45.75							74.1
58	25.5	76	84.4	74.7	95.6	62.1	15	44.275	45							73.9
60	25.5	76	80	82.9	80	64.7	15	44.025	43.25							73.3

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	25.4	76.7	86.3	106.2	61.6	42.7				76.4
H [%]		75.7			15.4	48.6				

Agua [L]	4.640
Salmuera o equivalente [L]	2.650
Evaporación [L]	1.990
Condensación [L]	0
	0%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #4

Prueba # 04 - Martes 1 de marzo 2022

Prueba de la producción de vapor Agua y Salmuera o equivalente - Aire al Evaporador a 80 °C - Agua del Condensador a 26.5 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor																
	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior	Evaporador Superior	Entrada Condensador		Medio Condensador	Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada			
T [min]	T 1 [°C]	H 1 [%]	T 2 [°C]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	H 5 [%]	T 6 [°C]	H 6 [%]	T 7 [°C]	H 7 [%]	T 8 [°C]	H 8 [%]	T 9 [°C]	H 9 [%]	T 10 [°C]
0	28.9	77	84.9	78.3	76.4	56.3	14	44	69.5	27.6	89	42.6	70	25.9	44	66.1
2	29.9	69	73.3	102.2	78.9	55	15	41.25	80	27.7	89	43.6	59	26.3	40	65.9
4	29.1	68	78.8	80.8	79.2	60.3	15	41.21	69.5	27.7	87	44.6	54	26.7	37	64.8
6	29.5	38					15	41.7	69.5	27.8	86	45	52	27	37	60.6
8	29.3	66		68.7	80.3	58.5	16	43	63	27.9	86	48.6	47	27	37	84.3
10	29.5	65	76.3	110	73	59.5	15	42.65	60	27.9	85	45.6	51	26.8	36	83.5
12	29.7	65	93.9	92.6	53.3	66.3	15	42.45	60	27.8	85	43.5	56	27.1	38	83.2
14	29.7	64	75	72.8	83.3	61.7	15	41.4	59.5	27.8	86	43.6	57	27	35	83.1
16	29.7	65	89	88	89.8		15	44.3	60	27.8	87	44.5	55	27.1	36	83.4
18	30.1	62	65.6	68.7	83.3	60.5	15	41.65	56.5	27.7	87	43.6	52	27	36	83.5
20	30.2	61	87.7	93	80.8	61.9	15	42.1	59	27.8	88	44.7	57	27	36	83.1
22	30.6	87	87.2	84.2	79.6	63.1	15	43.85	56	28.1	88	45.6	53	26.9	35	82.6
24	33.6	80	81.2	86.6	79.5	62.1	15	43.5	56	28	88	45.6	52	27	35	82.3
26	30.1	69	74.7	82	81.3	61.3	15	43.8	51	28.7	87	45.5	50	27.2	33	81.3
28	32.2	59	74.7	90.6	79.6	61.3	15	43.45	50.5	28.1	87	45.7	53	27.2	35	80.8
30	30.1	60	76.9	92.1	68.4	61.2	15	42.8	51.5	28	86	45.2	54	27.4	33	80.3
32	29.8	60	70.5	67.1	66.8	57.2	14	41.3	52	27.8	86	43.5	55	27	35	79.4
34	29.9	60	71.4	76.1	84.3	58.5	16	42.15	51	28	87	44.6	55	27	33	78.4

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
T [°C]	30.1		78.8	84.3	77.5	60.3	42.6	42.6	44.7	26.9	78.1
H [%]		65.3			15.0	59.7	86.9	54.6		36.2	

Agua [L]	4.340	
Salmuera o equivalente [L]	2.380	
Evaporación [L]	1.960	45.16%
Condensación [L]	0.41	21%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #5

Prueba # 05 - Martes 1 de marzo 2022

Prueba de la producción de vapor Agua y Salmuera o equivalente - Aire al Evaporador a 80 °C - Agua del Condensador a 26.5 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor																
	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior		Evaporador Superior		Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	27.4	77	74.3	80.5	89.2	48.3	17	43.1	70	38	76	26.7	99	26.7	33	75
2	28.8	69	87.8	89.6	87.7	57	16	41.4	73	43.6	59	27.7	99	27	33	75
4	29.4	66	83	81.1	74.3	60.3	15	45.3	62	44.3	53	27.5	99	27.1	35	75
6	29.9	64	78	73.9	79	62	15	45.95	59.5	46	50	28.6	99	27.4	35	75
8	30.3	62	80.8	81.8	88.5	61.2	15	42.45	66	45.4	53	28.4	99	27.4	35	75
10	30.6	62	78.3	81	66	61.9	15	40.8	64.5	44.1	49	28.6	99	27.6	33	75
12	30.5	60	86.1	83	73.4	63.7	15	42.9	64	45	52	28.7	99	27.7	33	75
14	31.1	58	76.8	81.7	76.6	63.9	15	44	65.2	46.2	49	28.7	99	27.7	33	75
16	31.5	58	76.1	75.5	78.6	61.1	15	43.8	61	46	49	28	99	27.7	33	75
18	31.4	58	76.6	76.3	91.8	59.9	15	44.1	57.5	48.8	80	29.1	99	27.8	35	75
20	31.5	58	68.7	72.4	61.6	62	15	42.7	50.5	44.9	44	28.6	99	28	33	75
22	31.3	59	77.2	78.7	92.9	54.1	15	43	53	48.6	49	29.1	99	27.9	33	75
24	31.7	58	88.9	92.5	87.8	61.1	16	42.25	59.5	48.6	45	29.7	99	27.9	35	75
26	31.9	58	82.6	82.5	79	64.3	15	44.95	49.5	49.4	44	29.7	99	28.1	33	75
28	32.5	57	77.2	78.3	86	63.9	15	45	48	49.9	43	29.5	99	28.2	33	75
30	31.1	57	73.6	58	97.1	61.5	15	44.45	45	48.4	46	30	99	27.7	33	75
32	29.8	61	73.6	98.8	93.6	61.3	15	43.8	48	47.5	50	30.1	99	27.9	33	75
34	29.6	61	67.3	72.3	89.5	59.3	15	42.95	48.5	45.2	46	29	99	27.7	33	75
36	29.9	63	74.3	81.1	96.2	62	15	44.2	46	47.1	49	30	99	27.6	33	75

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
T [°C]	30.5		78.0	79.9	83.6	60.5	43.5	46.2	28.8	27.6	75.0
H [%]		61.4				15.2	57.4	51.9	99.0	33.5	

Agua [L]	4.220
Salmuera o equivalente [L]	2.330
Evaporación [L]	1.890 44,79%
Condensación [L]	0.444 23%



## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #6

Prueba # 06 - Miércoles 2 de Marzo 2022

Prueba de la producción de vapor Agua y Salmuera o equivalente - Aire al Evaporador a 80 °C- Agua del Condensador a 26.5 °C

	Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor															Temperatura Agua de Entrada
	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior		Evaporador Superior		Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	27.6	77	78.7	78.2	80.3	62.1	15	42.4	82	43.7	56	25.6	99	28.2	49	75
2	27.5	77	74.7	74.2	88.3	63.3	15	43.8	82	45.8	53	25.5	99	28.6	48	75
4	27.5	78	81.4	89.8	83.8	64.5	15	44.85	82	47.1	51	25	99	28.5	47	75
6	27.7	76	82.6	80.7	85.2	64.8	15	43.7	75.5	45.4	54	25.6	99	28.7	46	75
8	27.8	76	76.6	77.8	99.7	64.5	15	42.7	77.5	45.4	54	25.5	99	29	45	75
10	26.8	76	76.8	77.6	92.3	62.3	15	42.7	77.5	45.4	54	25.5	99	29	45	75
12	26.1	75	76.6	78.8	92.7	64.8	15	44.85	76	48	51	25.6	99	29	44	75
14	27	78	84.8	89.2	77.8	63.5	15	44.5	77.6	46.8	49	25.5	99	28.7	43	75
16	28.7	70	74.7	77.5	81.1	62.7	15	44.05	64	45.5	48	26.6	99	28.9	41	75
18	28.3	78	77.8	80.9	89.8	64.7	15	44.5	67	45.6	51	26.6	99	28.1	43	75
20	26.5	75	69.9	72.4	79.3	61.7	15	45.9	69	43.8	49	26.6	99	29	42	75
22	28.7	69	86.1	81.6	91.6	63.7	15	44.45	65	46.4	53	27.6	99	28.9	41	75
24	28.8	69	84.4	82	92.8	64.4	15	44.1	63.5	45.8	54	26.6	99	28.9	40	75
26	28.8	68	67.9	73.8	92.4	65.8	15	44.2	54	46	50	26.7	99	29.2	40	75
28	29.4	68	85.5	82.2	80.2	62	15	43.9	58	45.7	51	26.7	99	29.1	40	75
30	29.2	66	84.9	82.5	85.5	64.1	15	44.5	57	45.7	51	26.7	99	28.9	40	75
32	29	66	76.6	78.2	82.7	66.3	15	43.9	50.5	45	50	26.7	99	29	39	75
34	29.1	66	69	64.5	89.5	63.7	15	44.25	50	46.7	51	26.7	99	26.5	38	75
36	29.3	65	85.5	68.1	79	69.7	15	44.8	47.5	47.4	47	26.7	99	28.4	39	75
38	28.1	66	80.3	73.6	84.3	69	15	44.2	51	46.7	50	26.7	99	29	39	75
40	28	65	87.4	72.6	86	64.5	15	45	58	48.4	50	26.7	99	28.4	39	75
42	27.9	66	77.2	72.3	87.5	64	15	45.3	54	48.9	48	26.7	99	29.4	38	75
44	28	65	89.7	77.1	94.1	65.2	15	46.3	46	50.3	49	26.7	99	28.1	38	75
46	29.7	65	79.1	70.2	84.9	65.5	15	46.95	43.5	49.5	44	28.5	81	29.3	40	75
48	27.8	68	83.9	73.5	86.9	64.3	15	43.6	50.5	45.6	51	28	74	28.7	40	75
50	31.2	67	83.2	72.6	90.6	63.7	15	44	46	46.3	51	28.1	69	28.7	40	75
52	31.2	66	79.1	72.4	90.6	64.2	15	44	46.5	45.3	52	29	68	28.6	40	75
54	31.3	55	86.9	74.4	88.5	64.6	15	43.5	41.5	45.3	53	29.7	66	28.6	39	75
56	31.5	55	84.4	73.6	91.8	64	15	42.3	49	45.5	53	29	67	29	39	75
58	31.9	54	84.1	71.9	85.5	64.3	15	43.4	43.5	45.2	58	29	68	28.9	39	75
60	31.7	54	76.6	72	92.4	62.5	15	41.9	45.5	44.2	54	29	65	28.9	38	75

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	28.8	80.2	76.3	87.3	64.3	44.1	46.2	26.9	28.7	75.0
H [%]	68.4				15.0	59.7	51.3	91.5	41.3	

Agua [L]	4.380	
Salmuera o equivalente [L]	2.000	
Evaporación [L]	2.380	54.34%
Condensación [L]	0.85	36%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #7

Prueba # 07 - Miércoles 2 de marzo 2022

Aire al Evaporador a 80 °C- Agua del Condensador a 20 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor

	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior	Evaporador Superior		Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada	
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	29	64	76.1	76.1	80.7	60.3	15	42.7	58.5	44.5	56	28	99	29	35	75
2	29.2	63	84.1	89.7	87.6	66.4	15	44.8	53.5	45.9	58	27	99	28.9	33	75
4	29.4	63	73.3	78.2	76.8	60.7	15	45.6	44.5	44.7	52	27	99	29	35	75
6	29.3	62	74.7	76.7	72.2	61.9	15	44.45	45.5	43.8	53	27	99	28.9	35	75
8	29.4	62	72.6	73.5	82.6	60.5	15	47.2	41.5	44.7	52	27	99	29.1	35	75
10	29.5	61	76.9	73.5	76	60	15	46.45	41.5	44.3	52	26	99	28.8	35	75
12	29.5	61	84.9	80.6	74.9	65.4	15	46.7	40.5	45.7	54	27	99	29.3	35	75
14	29.7	61	84.4	81	83	64.7	15	47.9	42	45.5	55	27	99	29.2	35	75
16	30	61	74.7	78.9	84.5	63.6	15	46.6	41.5	44.4	54	27	99	29.2	35	75
18	30	61	78.7	79.8	83.6	62.7	15	46.8	42	44.8	54	27	99	29	35	75
20	30.1	61	76.6	77.6	76.6	64.5	15	47.5	38.5	45.4	51	27	99	29.2	35	75
22	30.3	61	80	79.2	79.8	63.9	15	48	40	45.7	54	28	99	25.4	35	75
24	30.4	61	88.5	82.5	90.6	64.1	15	47.5	43.5	44.8	58	27	99	28.4	35	75
26	30.6	61	85.5	85.5	86.2	62.7	15	47.15	43	44.4	56	27	99	29.4	35	75
28	30.6	61	90.8	83	67.2	69.6	15	47.3	39.5	44.7	52	28	99	29.4	35	75
30	30.5	61	93.2	83.8	87.9	69.4	15	50	41	47.3	56	29	99	29.3	33	75
32	30.5	60	83.5	76.8	89.6	65.9	15	48.25	42	46.9	56	28	99	29.3	35	75
34	30.3	60	79.6	76.4	85	62	15	46.45	41.5	44.6	55	28	99	29.5	36	75
36	30.3	61	82.7	79.3	83.6	62.8	15	46.55	42	44.9	55	28	99	29.5	35	75
38	30.3	61	83.2	77	75	63.7	15	45.65	41	42.7	54	28	99	29.4	35	75
40	30.8	61	82.6	76.2	73.4	63.7	15	47.05	40	44.7	54	28	99	29.5	35	75
42	30.7	61	77.2	74.5	79.8	63.1	15	47.6	39.5	44.8	56	28	99	29.2	36	75
44	30.3	61	88.6	77.5	77.4	66.8	15	48.6	40	45.5	55	28	99	29.1	33	75
46	30.3	61	87.4	80.5	88.5	65.8	15	49.2	40.5	45.9	55	28	99	29.4	35	75
48	30.3	61	80.4	76.6	83.9	63.5	15	48.7	40	45.6	54	28	99	29.4	36	75
50	30.3	61	81	71.3	77.5	65.4	15	48.05	40.5	44.9	54	28	99	29.7	35	75
52	30.3	61	90.2	77.7	79.8	64.7	15	48.4	44	45.3	56	29	99	29.5	35	75
54	30.2	61	64.3	58.4	47.4	62.1	15	42.3	41.5	40	51	28	99	25.2	35	75

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	30.1	81.3	77.9	79.7	63.9	46.9	44.9	27.6	28.9	75.0
H [%]	61.3				15.0	42.5	54.4	99.0	34.9	

Agua [L]	5.070
Salmuera o equivalente [L]	2.480
Evaporación [L]	2.590
Condensación [L]	39%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #8

Prueba # 08 - Jueves 3 de marzo 2022

Aire al Evaporador a 80 °C- Agua al condensador a 15 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor

	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior	Evaporador Superior	Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada		
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	27.4	73	75	68	80	60.1	15	42.25	74	41	74	25.6	99	23.4	52	75
2	28.8	70	84.9	82.8	71.3	59.5	15	41.7	77	56	43.3	24.6	99	26.1	57	75
4	28.1	69	94.5	72.1	99.1	62.6	15	43.2	62.5	44.3	71	27.6	99	25.8	53	75
6	28	67	81.7	73.5	73.3	58.3	16	44.1	78	44.1	59	26.6	99	27.4	56	75
8	28	67	76.1	71.7	74.8	58.9	16	45.95	73	45.1	55	25.6	99	27.7	56	75
10	28	68	72.6	67.9	85.2	57.1	14	44.2	78.5	44	64	25.6	99	28.1	62	75
12	28	68	65.3	53.8	64.2	55.3	15	41.05	79.5	42.3	57	25.6	99	27	57	75
14	28	69	80.2	69.8	57.2	53.1	16	39	72.5	38	54	22.5	99	26.1	58	75
16	27.9	71	62.2	70.2	98	58.2	16	41.6	72.5	42.9	60	24.6	99	25.9	58	75
18	28.1	66	70.5	65.9	60.8	57	14	42.8	70	42.2	54	24.6	99	27.4	55	75
20	29	63	77.2	70.5	74.9	62.7	15	46.55	52	45.9	51	28.6	99	28.2	39	75
22	29.2	63	82.7	77.9	81.9	63	15	47.6	47	47	52	28.7	99	28.2	38	75
24	29	61	83.5	79	85	62.1	15	46.55	46	46.3	54	28.2	99	28.2	39	75
26	29	61	68.2	72	76.6	60.7	15	44.75	42	45	49	29.7	99	28.2	37	75
28	29.2	61	76.6	69.3	90.6	61.9	15	46.1	46.5	46.2	54	28.7	99	28.1	38	75
30	27.6	72	71.7	71.9	77.2	57.7	16	40.8	77	41.7	62	24.6	99	25.2	58	75
32	29	62	83.2	77.8	84.5	62.3	15	47.35	47.5	46.9	54	28.7	99	28.2	40	75
34	29	62	80.4	74.4	81	61.1	15	45.75	46.5	45.9	53	28.7	99	28.3	39	75
36	28.5	63	73.3	74.5	88.9	59.5	15	45.05	48.5	44.7	56	27.6	99	27.8	40	75
38	29	63	79.1	73.5	77.5	61.3	15	45.3	49.5	44.5	55	27.7	99	27.9	39	75
40	29	62	74.7	75.3	82.5	61.3	15	45.9	48.5	45	55	27.6	99	27.7	39	75
42	28.8	67	82.7	74.5	92.6	59.3	15	46.3	75.5	44.8	60	26.6	99	27.5	44	75
44	29	63	83.3	74.4	81	61	15	45.85	49.5	45.3	54	28.6	99	28	40	75
46	29	63	78	72	78.2	63.2	15	47	50	46.3	52	28.6	99	28.2	38	75
48	28.5	66	91.8	76.5	78.2	68.5	15	49.75	55	48.7	51	30.6	99	28	40	75
50	28.8	65	75.6	73.5	87.7	61.6	15	45.25	58	45	55	27.6	99	27.9	39	75
52	28.7	66	85.5	80	91.6	60.7	15	47.35	66	46.9	56	28.6	99	27.5	40	75
54	28	67	83.9	76.6	93.3	60.4	15	47.9	73	46.7	57	28.6	99	27.7	43	75
56	28	66	61.1	69.3	79.3	58.5	16	44.6	62.5	43.4	54	27.6	99	27.7	40	75

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	28.5	77.8	72.7	80.9	60.2	44.9	45.0	27.2	27.4	75.0
H [%]		65.7				15.1		56.0	99.0	46.0

Agua [L]	3.000
Salmuera o equivalente [L]	1.100
Evaporación [L]	1.900
Condensación [L]	0.9
	47%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #9

Prueba # 09 - Jueves 3 de marzo 2022

Aire al Evaporador a 80 °C- Agua al Condensador 10 °C

Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor

	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior	Evaporador Superior	Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada		
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	28	66	80.4	62.3	80.3	56.3	14	44.1	45.5	44.6	64	26.1	99	28.2	33	75
2	28	63	80	67.3	87.8	58.4	16	43.2	65	46.6	62	27.2	99	28.1	31	75
4	28.3	61	73.3	63.4	81.5	59.5	15	48.5	47	46.7	54	27	99	29.2	31	75
6	28.5	61	73.3	63.4	81.5	59.5	15	48.85	47	46.7	54	27	99	29.2	32	75
8	29.3	61	83	67.6	89.9	60.4	15	51.5	42.5	48	56	27	99	28.2	33	75
10	29.3	61	91.4	68.8	89.5	64	15	50	44	49.6	53	27	99	27.9	33	75
12	29.5	62	82.1	66.7	84.5	65.7	16	49.5	45.5	49.1	51	28.4	99	27.5	35	75
14	29.4	62	79.2	64.5	86	61.9	15	46.7	46.5	47.7	52	27	94	27.4	35	75
16	29.5	62	88.5	66.9	84.9	65.6	15	47.7	45.5	47.7	53	28	98	27.3	36	75
18	29.4	63	86.1	70	97.5	66.3	15	48	46	48.8	55	28	99	27.4	35	75
20	29.5	63	94.5	69.6	89.6	67.5	5	47.2	48.5	50.3	51	28	99	27.4	36	75
22	29.6	62	84.4	67.1	86.9	68.5	15	47.85	45	49	52	28	98	27.8	36	75
24	29.2	62	82.4	63.7	78.3	68	15	47.3	45.5	48.2	49	28	98	27.2	35	75
26	29.3	62	81.2	64.8	87.8	68.1	15	45	46	46.4	53	27	93	27.4	36	75
28	28.9	62	89.2	65.7	87	63.7	15	45.55	46	46.5	53	27	92	27.5	35	75
30	28.8	62	78.8	63.7	79.8	64.8	15	45.9	44.5	46.9	52	27	95	27.6	36	75
32	29.6	62	85.5	66.7	84.1	64.4	15	45.3	46	46.4	54	27	96	27.4	35	75
34	29.5	63	76.1	63.8	81.5	64	15	46.55	42.5	47.8	50	27	95	27.1	36	75
36	30.6	63	64.9	66.1	81	64	15	48.3	43.5	47	52	27	92	27.1	36	75
38	29.5	63	82.7	67.5	88.5	64.5	15	49.05	41	47.5	51	27	95	27.4	36	75
40	29.6	63	83.9	64.7	76.3	63.7	15	47.75	41.5	45.5	52	27	93	27	37	75
42	29.7	62	85.5	64	74.5	64.2	15	47	40.5	46	51	26	93	27.2	36	75
44	29.8	62	76.9	67.2	89.5	65	15	50.5	39.5	46.3	53	27	93	27	36	75
46	29.5	61	75	61.3	73	59.4	15	46.65	37	44.1	51	26	98	27	35	75
48	29.4	61	81.2	67.9	90.6	61	15	53.25	37	47.7	54	26.6	91	28.2	36	75
50	30	61	84.9	62.7	74.4	64.3	15	54.3	27	46.7	50	27	94	27.8	35	75

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	29.3	81.7	65.7	84.1	63.6	47.9	47.2	27.1	27.6	75.0
H [%]	62.2				14.7	44.1	53.2	96.1	34.8	

Agua [L]	4.780
Salmuera o equivalente [L]	2.010
Evaporación [L]	2.770
Condensación [L]	1.435
	57.95%
	52%

## RESULTADOS PRUEBA PROTOTIPO #10

Prueba # 10 - Viernes 4 de marzo 2022

Aire al Evaporador a 80 °C- Agua al Condensador 7 °C

	Temperatura y Humedad Relativa del Flujo de Aire y Vapor															
	Aire Entrada		Calentador Inferior	Calentador Medio	Calentador Superior	Evaporador Inferior		Evaporador Superior		Entrada Condensador		Medio Condensador		Salida Condensador		Temperatura Agua de Entrada
T [min]	T1 [°C]	H1 [%]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	H5 [%]	T6 [°C]	H6 [%]	T7 [°C]	H7 [%]	T8 [°C]	H8 [%]	T9 [°C]	H9 [%]	T10 [°C]
0	29	70	90.8	75.8	85.3	66.5	15	47.2	72.5	44.4	60	32.6	99	27.7	45	75
2	29.7	69	89.1	76.5	78.7	66.7	15	46	69	44.8	57	33.5	99	27.2	42	75
4	28.2	69	64.7	91.6	55.5	61.3	15	42.8	63.5	40.6	55	31.6	99	27.4	42	75
6	28.4	68	83	72.5	83.3	62.6	15	46.85	63	43.7	59	32.9	99	27.2	43	75
8	28.5	67	71.4	82.5	91.3	63.1	15	46.95	52	43.9	57	32.6	99	27	41	75
10	28.7	67	84.4	72.1	77.2	63.2	15	48.5	51	44.2	56	32.6	99	27.6	44	75
12	28.5	66	87.8	73.6	100.6	63.9	15	49.7	48.5	46	57	33.6	99	27.5	41	75
14	28.7	66	81.7	70.7	84.6	63.5	15	49.4	46	45.9	54	33.6	99	27.9	42	75
16	28.4	66	82.6	73.5	87.7	65.5	15	48.5	47	44.5	56	33.6	99	27.7	43	75
18	29	66	70.5	68.9	83.8	62.3	15	48.35	42	44.7	53	33.6	99	27.7	40	75
20	28.8	65	80	73.5	83.3	63.4	15	48.8	42	44.8	55	33.6	99	27.9	40	75
22	29	64	67.3	68.3	74.8	64.5	15	47.25	37.5	43.8	51	33.5	99	27.5	40	75
24	29.3	64	80.4	73.5	98.4	62.2	15	47.55	44	44.9	57	33.6	99	27.9	42	75
26	29.1	64	92.6	78.3	85.2	66.2	15	47.8	44	45.8	57	29.8	73	28	40	75
28	29.3	63	72	71	73.3	65.4	15	46.6	38.5	43.7	53	29.6	73	27.1	39	75
30	29.7	63	95.2	78.5	77.7	68.4	15	50	38	45.4	55	22.6	79	26.8	39	75
32	29.8	63	66.5	69.3	82.5	65.2	15	46.8	36.5	43.6	53	22.5	86	26.5	40	75
34	29	62	95.7	78.4	68.2	67.8	15	49	37.5	44.3	55	27.6	87	26.4	39	75
36	29.5	62	76.9	73.6	81.7	67.7	15	47.3	36.5	43.8	54	27.5	86	26.7	38	75
38	28.7	63	89.1	77.5	110	64.2	15	51.25	35.5	48.1	57	22.3	99	26.6	39	75
40	29.2	63	65.5	66.9	73.2	62.5	15	47.35	30.5	44.7	46	20.2	85	26.8	39	75
42	29	64	92	78.2	86.2	65	15	49.2	35.5	46	55	20.6	97	26.4	39	75
44	28.7	64	72	71.5	86.2	63.5	15	47.15	33.55	44.9	52	21.7	96	26.5	39	75
46	28.3	64	86.1	75.3	74.5	66.7	15	47.85	33.5	44.5	53	20.5	92	26.7	37	75
48	28.7	64	81.9	74.3	81.4	64.9	15	47.3	35	44.8	54	21	91	26.5	37	75
50	28.7	64	86.1	74.8	70.7	66.7	15	46.75	35.5	42.7	56	20.6	95	26.5	39	75
52	29	64	69.9	64.4	90.1	64.4	15	47.35	31	44.3	54	21.7	98	25.8	37	75
54	28.8	64	87.4	62.9	68.1	64.5	15	42.7	32.5	43.2	55	20.7	95	28.7	37	75
56	29	64	78.7	69.6	84.1	65.3	15	43.5	35	44.8	57	21	96	25.5	38	75
58	27.3	72	100.3	81.9	110	56.4	15	29.9	60	26.5	63	26	76	26	38	75
60	27.9	72	71.4	93.2	79.6	55.3	15	31.4	60	26.9	64	26	76	26.1	37	75

### PROMEDIO DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T [°C]	28.8	81.1	74.6	82.8	64.2	46.4	43.4	27.5	27.0	75.0
H [%]	65.4				15.0	44.1	55.5	92.5	39.9	

Agua [L]	4.430
Salmuera o equivalente [L]	1.840
Evaporación [L]	2.590
Condensación [L]	1.21
	58.47%
	47%



## 5. CONCLUSIONES:


Finalmente, con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al prototipo de desalación termosolar bajo las condiciones controladas en el laboratorio, podemos concluir que:

- Al alimentar el sistema con una cantidad promedio de 4.33 litros de agua, obtuvimos un promedio de 2.45 litros de agua evaporada lo que equivale a un 57.03% de eficiencia en la evaporación del sistema, y 0.89 litros de agua condensada para una eficiencia de 44.2% de condensación con relación a la cantidad de agua alimentada al sistema.
- Con una temperatura inicial de 26.5°C la eficiencia de condensación obtuvimos un 21% de eficiencia y, en la medida en que la temperatura de condensación disminuyó la eficiencia de condensación aumentó hasta alcanzar la mayor eficiencia a 10°C a un 52% de eficiencia de condensación de agua.
- Obtuvimos en promedio 1.87 litros de salmuera o su equivalente, equivalente al 43% del agua con la que se alimentó el sistema.

El presente documento se expide a solicitud de la parte interesada y se hace legítimo siempre que cuente con las firmas y sellos de sus involucrados. Los resultados obtenidos de las pruebas demuestran que tanto el modelo conceptual concebido, el prototipo armado y probado aseguran una funcionalidad del proceso de extracción de salmuera o su equivalente y agua potable.

Finalmente, certificamos como bueno y válido los procedimientos y resultados obtenidos de las pruebas realizadas en laboratorio. Esto confirma el potencial que representa este tipo de tecnología de extracción.



  
Director Ing. Electrónica  
Colegiatura 23579

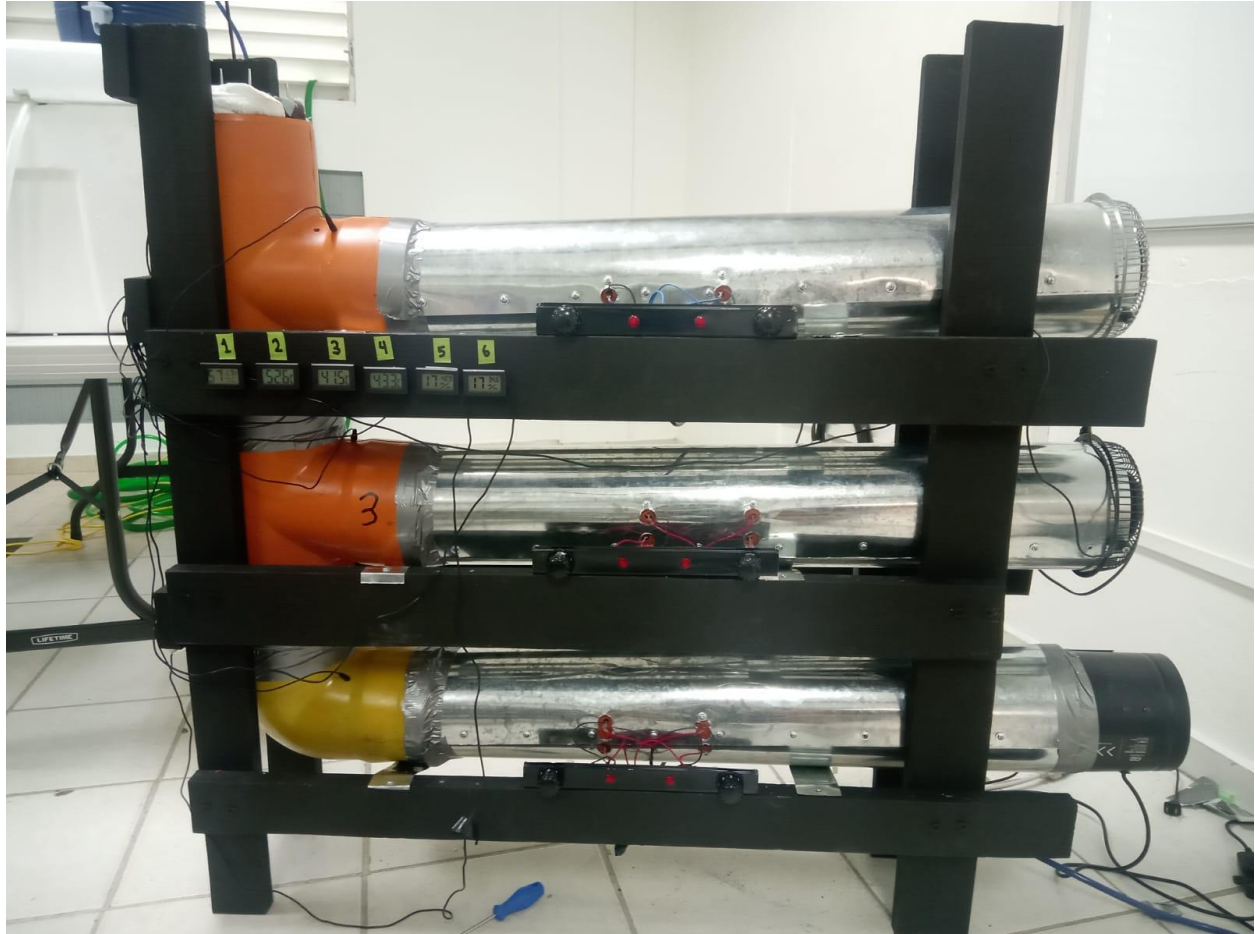
  
Director Ing. Mecánica  
Colegiatura 4878

Prototipo Desalinización

# Informe Pruebas del Prototipo en UTESA

## Parte 1 (6 días)

feb, 2022.



Detallaremos lo realizado en los primeros 6 días de prueba en la Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA).

---

## **Primer día (lunes 21 de febrero del 2022)**

Llegamos a la Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA) con el prototipo para realizar las pruebas correspondientes en el laboratorio.

Fuimos recibidos por el Vicerrector de Investigación Científica, los directores de Ingeniería Electrónica y de Ingeniería Mecánica y demás personal que nos asistieron durante el proceso.

Se hizo una reunión de introducción donde se mostró el prototipo, se explicó cómo funciona y se organizó el cronograma a realizar en los siguientes días.







---

## **Segundo dia**

### **(Martes 22 de febrero del 2022)**

Se trasladó el prototipo a otro laboratorio ya que en el anterior se iba a impartir clases de manera regular y era un área que muchos estudiantes y personal no involucrado tenían totalmente acceso. Por esa razón, sabiendo que es un proyecto de naturaleza confidencial, se decidió cambiar el lugar.

En el nuevo laboratorio se presentaron problemas técnicos y se tomó cierto tiempo en poder resolverlos.



---

## **Tercer día**

### **(Miércoles 23 de febrero del 2022)**

Empezamos a realizar las pruebas con el prototipo pero a causa de una falla en un ventilador (situaciones normales en pruebas de laboratorio) se deformaron los tubos calentadores (aun siendo estos resistentes a altas temperaturas) debido al exceso de calor.

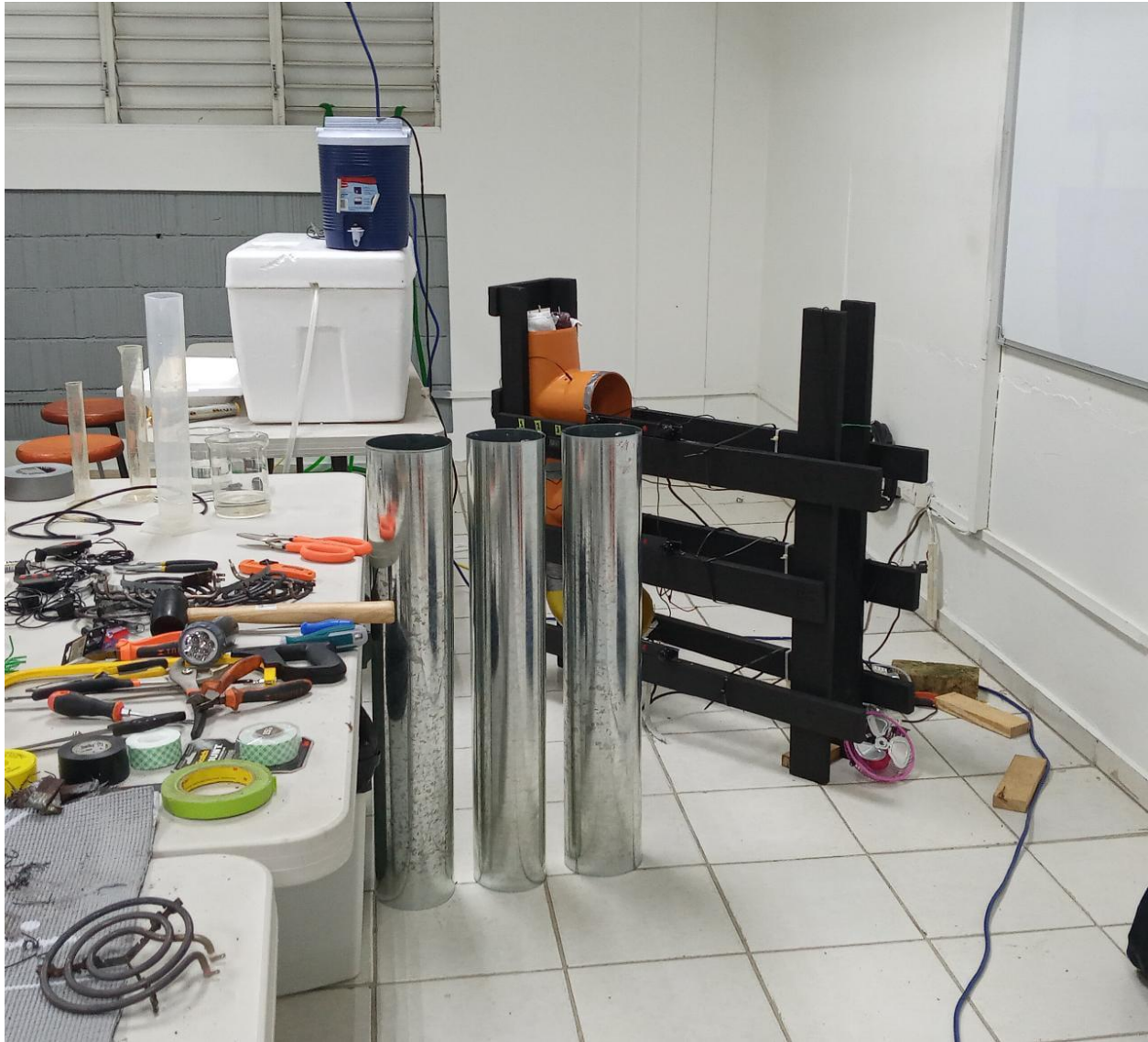
Luego de lo sucedido, se compraron nuevos materiales para hacer tubos metálicos y hacerlo más resistente por si ocurren futuras fallas durante las pruebas.



---

## Cuarto día (Jueves 24 de febrero del 2022)

Desarmamos el prototipo y construimos los tubos a partir de planchas metálicas para sustituir los antiguos y esto nos tomó todo el día debido al arduo trabajo para realizarlo.

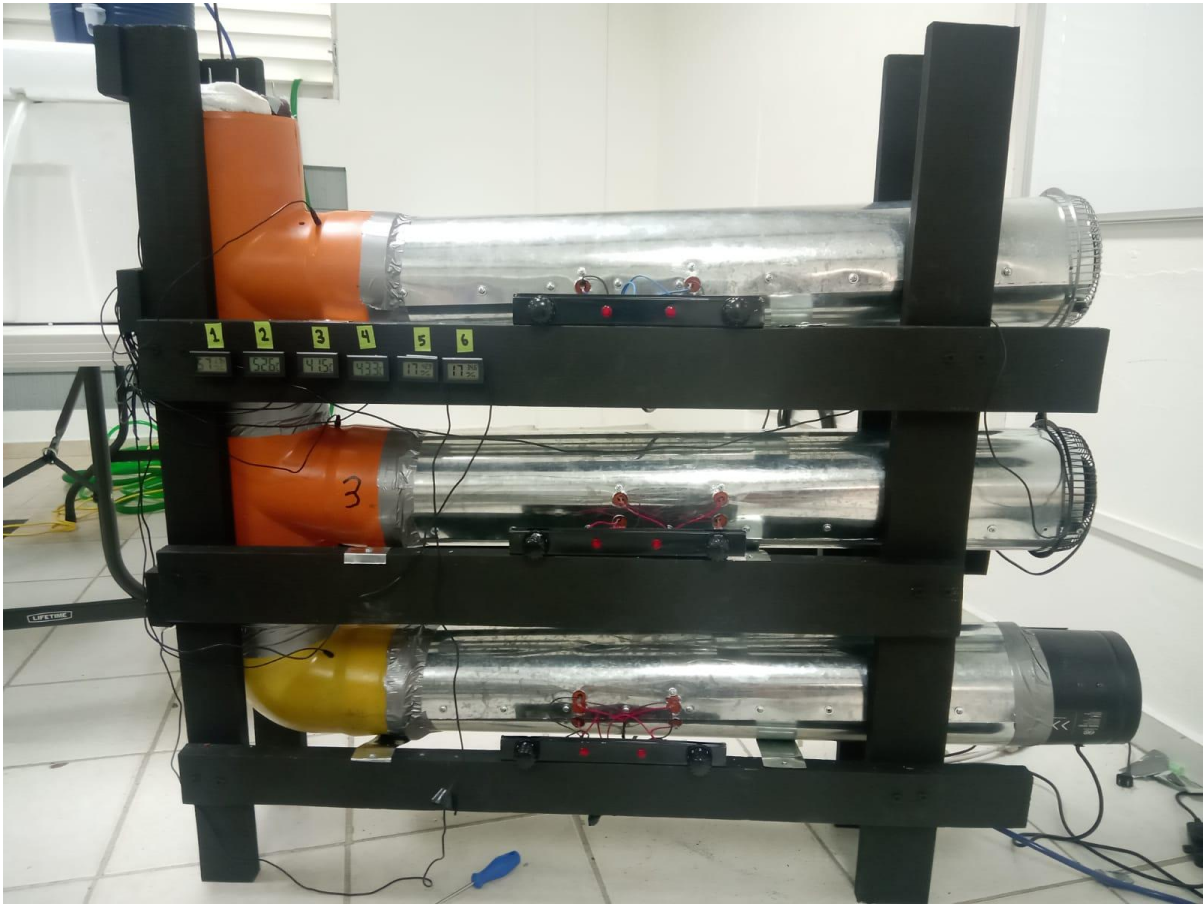


---

## Quinto día (Viernes 25 de febrero del 2022)

Terminamos de armar el prototipo y realizamos la **primera prueba**.







---

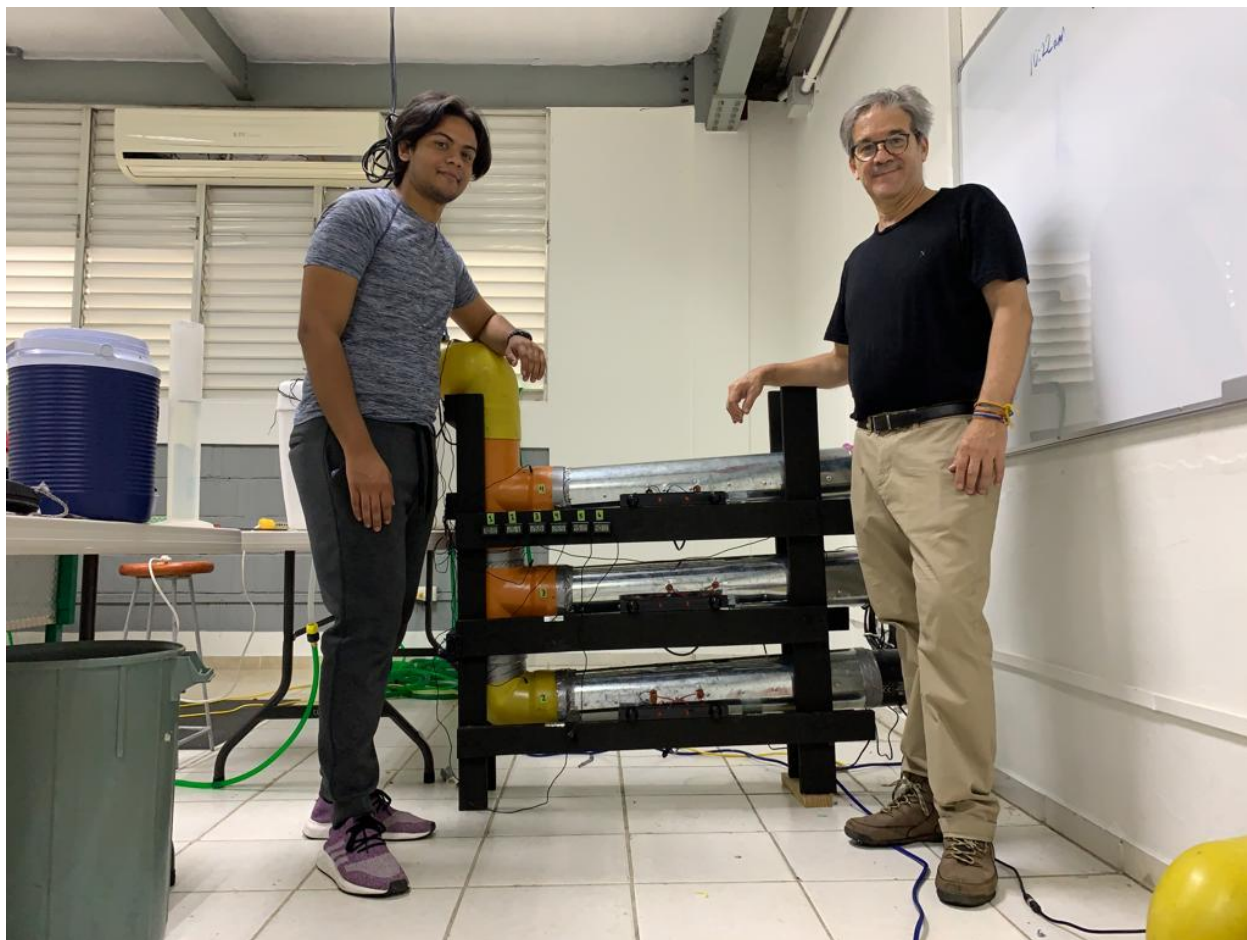
## Sexto día

(Sábado 26 de febrero del 2022)

Realizamos una **segunda prueba** (trabajamos hasta el mediodía).







Realizado por:

**Víctor de la Rosa**

*Técnico de Proyecto/Ingeniero*

*Instituto Dominicano de Desarrollo Integral (IDDI)*

*Santo Domingo, República Dominicana.*

Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)



**Propuesta Técnica y Económica para la conceptualización,  
diseño y construcción de un prototipo escalable para desalación  
de aguas marinas y salobres con tecnología termo solar de baja  
capacidad para zonas rurales.**

Informe-01

Santo Domingo, República Dominicana

12 diciembre 2022

## **Contenido**

### **Resumen**

#### **1- Fundamentos del proyecto**

##### **1- undamentos del proyecto**

El acceso a agua potable en el mundo cada vez es menor. Se estima que para el 2050 alrededor de 4 mil millones de personas se verán afectados por falta de agua potable. Esta también es una de las amenazas más grande para la sostenibilidad del medio ambiente. Los sistemas de desalinización son alternativas viables que pueden implementarse de diversas maneras dependiendo la necesidad y la localización. Como este proyecto se basará en el desarrollo de un sistema de bajo costo y específicamente termo solar, nos enfocaremos en los diferentes sistemas termo solares para determinar cuál sería más viable (Al-Fulaij, 2011).

Las tres tecnologías más comunes para la desalinización son las de base membrana, de base térmica, y de base electroquímica. Dentro de estas tres, hay más subcategorías de métodos, tales como manejado eléctricamente, con evaporación, etc. Las tecnologías de desalinización tienen en común el consumo intensivo de energía, por lo que la diferencia, aparte del método de generación, está en el costo y para interés de este proyecto, la implementación de energía solar como fuente (Li et al., 2021).

La desalinización a nivel mundial alcanza hoy en día alrededor de 95 millones de metros cúbicos al día, cifra que, aunque parezca abundante no abarca siquiera el consumo de los países del medio oriente que más producen agua a través de estas tecnologías (Theses et al., 2018).

La tecnología de desalinización tiene potencial de convertirse en tecnología líder en áreas de bajos recursos al implementarse con sistemas de energías renovables y a bajo costo. Las zonas rurales o de difícil acceso o zonas áridas y desérticas, en donde tampoco existen depósitos o reservas de agua dulce disponibles para tratar y distribuir para consumo humano, que son fuentes limitadas del líquido, son algunos de los lugares que podrían beneficiarse. En este proyecto se explorará la implementación de un prototipo de desalinización de bajo costo utilizando una de las tecnologías existentes.

### **1.1- Planteamiento y formulación del Problema**

En las zonas de clima árido que no cuentan con depósitos o reservas de agua dulce, es difícil para las comunidades de escasos recursos conseguir agua potable para realizar sus actividades domésticas diarias y consumo de agua. Este proyecto tiene la finalidad de abarcar esta problemática con una planta de desalinización termosolar y un sistema de evaporación instantánea multietapa o MSF.

### **1.2- Hipótesis**

Es posible producir un metro cúbico diario de agua desalinizada con un prototipo de desalinizador termo solar basado en la evaporación multietapa, de fácil manejo para comunidades costeras que carecen del recurso agua.

### **1.3- Objetivos**

- Construir un prototipo de una planta desalinizadora termosolar basado en un sistema de evaporación instantánea multietapa para la generación distribuida de agua potable basado en la desalinización termo solar con la capacidad de producir  $1 \text{ m}^3$  de agua diario.

#### **Objetivos específicos del proyecto**

- Identificar los elementos técnicos para el diseño y el cálculo de una desalinizadora termo solar para producir  $1 \text{ m}^3$  de agua diario.
- Diseñar un prototipo de desalinizadora termo solar para producir  $1 \text{ m}^3$  de agua dulce.
- Simular el funcionamiento del prototipo desarrollado para validar el diseño y los cálculos realizados.
- Construir un prototipo sencillo capaz de ser operado por una persona no experta.
- Validar el funcionamiento del prototipo construido en una zona costera, donde no se encuentran reservas subterráneas de agua dulce.

### **1.4- Justificación**

Dentro de los diferentes tipos de sistemas de desalinización termo solar, se encuentran principalmente los sistemas Evaporación Instantánea Multietapa (MSF), Ósmosis Inversa (RO) y Destilación Multiefecto (MED). Cada uno cuenta con un requerimiento promedio de consumo de energía por cada  $\text{m}^3$  de agua potable que produce. El sistema RO consume entre  $3.5$  a  $5.5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  de electricidad, el MSF entre  $2.5$  a  $3.5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ , y el MED entre  $1.5$  a  $2.5$

$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ . Ambos el MSF y el MED requieren adicionalmente  $290 \text{ kJ/kg}$  de energía por cada  $\text{m}^3$ . Estos valores nos ayudan a plantear inicialmente una comparación energética y la viabilidad que tendrían en la República Dominicana, que al necesitarse en zonas de bajos recursos inmediatamente nos llama la atención los sistemas MSF y MED por requerir menos electricidad (Li et al., 2021).

En los sistemas termo solares la energía eléctrica se suministra a través de fuentes de energías renovables fácilmente. Con esto también el sistema tendrá una huella de carbono mucho menor. Entre los sistemas MED y MSF se encuentran los más comunes para la utilización de energías renovables como fuente, sin embargo, a estas ser intermitentes se requieren sistemas de almacenamiento de energía para lidiar con este problema (Li et al., 2021).

Debido a que el requerimiento de agua dulce del proyecto es de  $1 \text{ m}^3$ , un sistema eficiente como el caso del sistema MSF sería la opción más adecuada porque es uno de los que consume menor energía y son modificables para el uso de energía renovable.

Actualmente en la República Dominicana, las condiciones de suministro de agua potable por parte del estado dominicano no son favorables. Las ciudades principales cuentan con interrupción en el servicio de agua por escasez, averías, entre otros siniestros. Peor aún es la situación en las afueras de la ciudad o en zonas rurales del país, donde no existen sistemas de distribución de agua potable y en donde los habitantes dependen de ríos y fuentes externas. Un sistema de desalinización puede ser una alternativa para las zonas costeras de la República Dominicana que están poco desarrolladas.

El proyecto responde al objetivo 6 (Agua limpia y saneamiento) de los Objetivos de Desarrollo Sostenible al 203; al eje 4 de la Estrategia Nacional de Desarrollo de la República Dominicana y a la estrategia de adaptación de los NDC.

## **1.5- Alcance**

Este prototipo será instalado en una comunidad de la provincia de Monte Cristi, República Dominicana. Esta es una zona árida del país y de bajos recursos donde actualmente consta con una comunidad en desarrollo que está en la necesidad de diferentes servicios básicos, como el agua potable para el uso doméstico de sus habitantes.

Por esta razón el prototipo tiene que ser de bajo costo para poder ser adquirido por la comunidad. Tiene que aprovechar al máximo la cantidad de agua salada de mar, generando así la mayor cantidad de agua dulce posible. Finalmente, también tiene que ser fácil de operar por una persona que no sea experta, por ende, tiene que ser fácil de entender y utilizar.

## **2- Descripción General**

El agua potable muy bien puede considerarse como el recurso más importante para la humanidad, y el acceso a la misma no está garantizado. En muchas zonas de bajos recursos el agua potable es inexistente y sus habitantes sobreviven con agua contaminada o agua obtenida ineficientemente al depender de ríos u otras fuentes. La necesidad de soluciones autosustentables, económicas, y limpias son más que inevitables.

Las pequeñas islas del Caribe tienen grandes obstáculos a la hora de suplirse con productos de necesidades básicas. Ya que son islas pequeñas, no cuentan con la geografía de otros países tales como tierra vasta para cultivar o sistemas de ríos y generalmente por obligación tienen un gasto elevado de importación para estos insumos.

En este proyecto se construirá un prototipo modular, para fines de fácil transportación, de generación distribuida de agua potable basado en la desalinización termo solar con la capacidad de producir 1 m<sup>3</sup> de agua diario, con el fin de analizar la posibilidad de aplicar este sistema u otros similares para una solución permanente a un problema que afecta a millones de personas alrededor del mundo, entre ellos a nuestro país. Se aclara que para fines de prototipo se trabajara en aplicar la tecnología de una planta multi etapa, pero solamente con una etapa. Esto conlleva una adaptación en el tema energético y también una diferencia en generación de agua al compararse con una planta de varias etapas, sin embargo, demostrar esta tecnología es el primer paso hacia una solución viable y permanente para una problemática tan amplia.

### **2.1 Estado del arte**

En muchas zonas áridas costeras y no costeras, al igual que también en pequeñas islas, la desalinización puede muy bien ser la única solución viable para la producción de agua potable. En el mundo, la adopción de la tecnología de desalinización, especialmente en los países del golfo Pérsico, ha crecido bastante desde sus inicios en la década de los 1950s (Li et al., 2021).



Los países del golfo Pérsico generan el 50% del agua a través de la desalinización de toda la industria global, lo que los hace líderes del mercado. Desde los años 80, estos países han utilizado el agua obtenida de la desalinización como fuente principal para uso doméstico, industrial y agricultura. Específicamente, las plantas MSF (Evaporación Instantánea Multietapa) son las más utilizadas en el medio oriente. Las razones principales son su alta capacidad de generación de agua dada una eficiencia térmica relativamente alta, lo cual se traduce en un mejor rendimiento con menores costos. Hoy en día las plantas MSF del medio oriente generan una cantidad *por unidad* que ronda entre los 50,000 m<sup>3</sup> a 75,000 m<sup>3</sup> diarios, con entre 2-12 unidades de producción (Al-Fulaij, 2011).

Aunque existen plantas de desalinización tipo MSF, solo a gran escala se encuentran en el medio oriente.

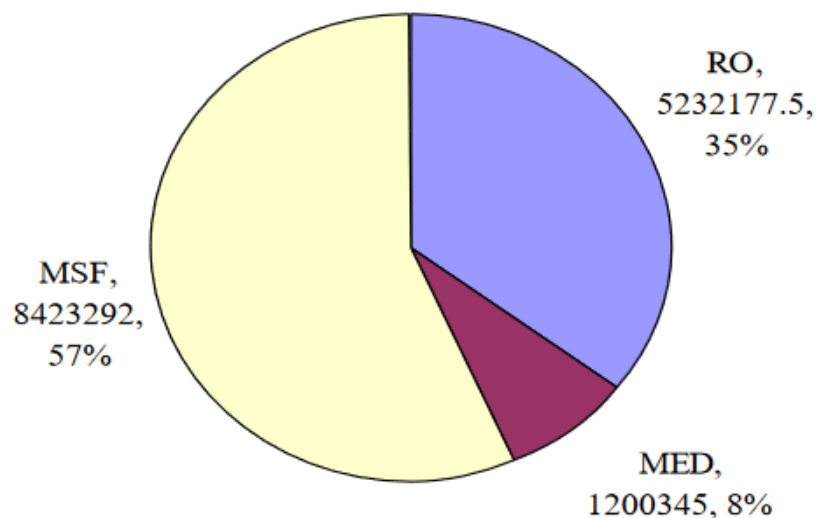


Figura 1. Distribución de mercado de desalinización a través del uso de agua de mar (Al-Fulaij, 2011).

Para dar a conocer un poco la magnitud de estas grandes plantas se pueden mencionar algunos de los ejemplos de plantas existentes. En el año 2009 se instaló una planta MSF en Shoaiba (Arabia Saudita), que cuenta con 12 unidades que producen 73,645 m<sup>3</sup> diarios cada una con un total de 22 etapas individuales en cada unidad. Esta planta en su totalidad produce 883,742 m<sup>3</sup> de agua diario, siendo una de las plantas más grandes del mundo (Al-Fulaij, 2011).

Por otro lado, la tecnología de osmosis inversa es la más popular y utilizada alrededor del mundo fuera de la desalinización de agua de mar, que como se mencionó la tecnología MSF es la que domina. La tecnología de membrana se utiliza generalmente para tecnologías de

tratamientos de agua ya que la aplicación de la misma alcanza a remover constituyentes tales como solidos disueltos, carbón orgánico, iones inorgánicos, entre otros compuestos orgánicos (Libotean, 2008).

La osmosis inversa es utilizada para generar agua potable y agua ultrapura, con fines de consumo humano, al igual que uso doméstico, agrícola o industrial ya que su tecnología es capaz de remover impurezas más que cualquier otra. Las plantas de tratamiento de agua en la Republica Dominicana por ejemplo son en su mayoría a través de la osmosis inversa.

## 2.2 Marco teórico

### 2.2.1 Clasificación de los procesos de desalinización

En la figura 2 y 3 se muestran las distintas clasificaciones de los sistemas de desalinización de agua. Nuestro proceso de desalinización se encuentra siendo parte de los procesos impulsados térmicamente, a través del calentamiento de agua, utilizando la evaporación. En la imagen y, se observan los distintos tipos de energía renovable que se utiliza con cada uno de los procesos o sistemas de desalinización, en la cual se puede ver que el sistema MSF es utilizado con energía solar.

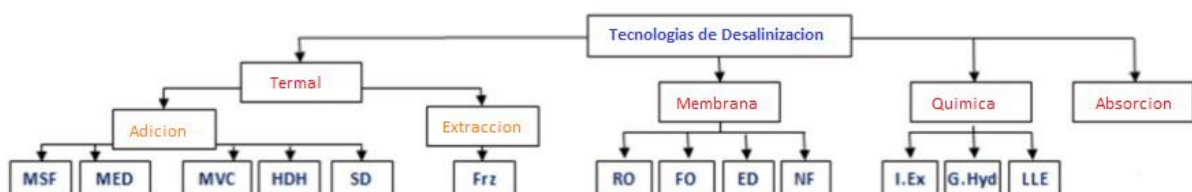


Figura 2. Clasificación de los sistemas de desalinización según su sistema (Theses et al., 2018).

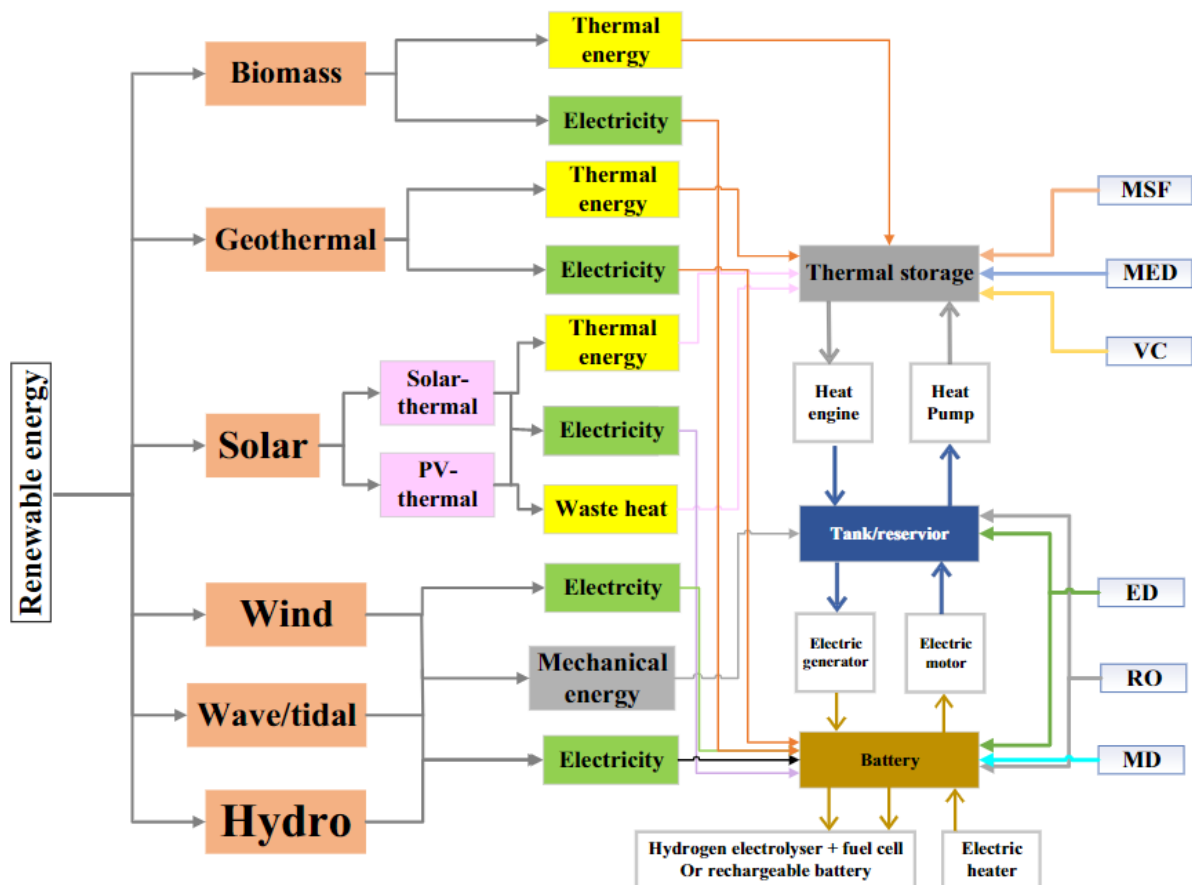


Figura 3. Aplicación de energías renovables según el tipo de sistema implementado (Al-Fulaij, 2011).

### 2.2.2 Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)

El sistema Multi-Stage Flashing (MSF) (ver figura 4), en español Evaporación Instantánea Multietapa, es un proceso donde la salmuera se procesa en diferentes etapas. En cada nueva etapa la presión es menor que en la precedente y a su vez menor que la presión atmosférica. De esta manera se obtiene una rápida evaporación del agua (flash) y al pasar a la siguiente etapa se extrae más agua. El agua salada se calienta sobre su temperatura de saturación en un calentador de salmuera a través de vapor de agua que rodea el sistema de tuberías que contiene el agua salada. En esta etapa es donde se requiere energía externa, la cual, en el caso de la figura 4, proviene de foto celdas solares.

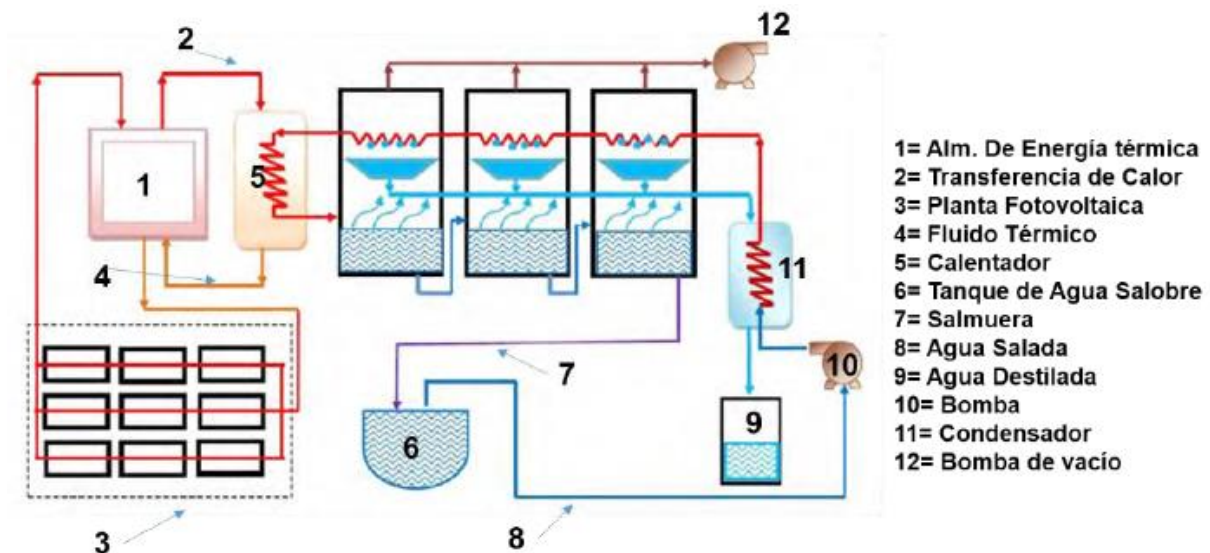


Figura 4. Ejemplo de funcionamiento de una planta desalinizadora con sistema MSF (Gómez, 2018).

El objetivo principal de una planta MSF, en comparación con una planta más simple de una sola etapa, es aumentar el valor de la relación de rendimiento del sistema aumentando la cantidad de etapas.

En una planta a gran escala el sistema funciona de la siguiente manera:

1. El agua de mar pasa por un proceso de desaireación y se trata químicamente antes de introducirse en los tubos de condensación a la última etapa del sistema.
2. El agua de mar se va precalentando a través de intercambio de calor en contracorriente con el vapor dentro de cada cámara.
3. La salmuera entra a un calentador donde se termina de llevar a la temperatura de saturación específica dada por el nivel de presión de la primera cámara.
4. La salmuera entra a la primera cámara, donde se crea vapor de agua a través del *flashing*.
5. La salmuera continúa entrando a las cámaras subsiguientes, cada una con una presión menor, causando el *flashing* una y otra vez extrayendo cada vez más vapor de agua.
6. El vapor asciende dentro de la cámara condensándose en los tubos de alimentación del agua de mar que va hacia el calentador.
7. El agua condensada se recolecta dentro de cada cámara en una tolva, y a través de una corriente de agua conectando la tolva de cada cámara afuera un tanque final de recepción del agua.

Algunas notas importantes a la hora del diseño de una planta MSF es que la última cámara se limita a que la salmuera esté a menos de 30-40 °C. Por razones termodinámicas, una reducción por debajo de estas temperaturas causaría un aumento drástico en las dimensiones de cada cámara, aumentando naturalmente el costo de operación y reduciendo eficiencia (Al-Fulaij, 2011).

Otro dato para considerar en la funcionalidad de estas plantas es el hecho de que, en algunas condiciones de operación, gases tales como el aire y gases disueltos como la descomposición del  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  que existen dentro del sistema pueden reducir el intercambio de calor de la operación, incrementando la tendencia a corrosión y disminuyendo la cantidad de *flashing*. Esto da lugar a la necesidad de tener ventilación adecuada para proteger la eficiencia del sistema (Al-Fulaij, 2011).

Ya que estas plantas trabajan con agua con alto contenido de sal, los materiales a utilizar a la hora de fabricar las mismas tienen que ser resistentes a la corrosión. Por lo general se utilizan aceros inoxidable por su gran resistencia a ser corroídos. De los tipos de aceros inoxidables, el 316 L es especialmente utilizado para ser trabajado en ambientes marítimos expuestos al océano ya que su contenido de molibdeno del 2-3% le da un aumento a la resistencia a la corrosión frente a sus diferentes variaciones. De este acero están construidas las mayorías de plantas MSF. Las paredes, techos y compartimientos de las etapas en las plantas MSF están hechas de acero carbono revestidas de acero inoxidable 316 L en las áreas expuestas a mayor corrosión en el sistema. Encima de todo esto, las cámaras están altamente aisladas para proteger la pérdida de calor hacia el exterior (Al-Fulaij, 2011).

### **2.2.3 Humificación y deshumidificación (HDH)**

Dentro de las tecnologías de base térmica de evaporación, también tenemos la HDH. Este proceso de desalinización imita el ciclo natural de lluvia. Sus componentes principales son un humidificador, un deshumidificador, y un calentador. En el humidificador se humidifica el aire poniéndolo en contacto directo con la salmuera, y en el deshumidificador se pone aire caliente en contacto con salmuera fría. Esto causa que el vapor se condense y cree una corriente de agua potable. Como el sistema MSF, este tiene una inyección de energía térmica en el calentador para su funcionamiento (Khraisheh et al., 2022).

#### ***2.2.4 Desalinización de una etapa (SSD)***

Este tipo de sistema funciona de manera similar al MSF, con unas pequeñas diferencias. Al ser un sistema de una etapa la presión y temperatura son más bajas. Por lo general estos sistemas funcionan a presión de vacío ( $<0.1$  bar) y con una temperatura de salmuera menor a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Estos sistemas son menos costosos ya que necesitan menos energía por las temperaturas que manejan, especialmente en costo de instalación, pero sacrifican en gran parte la cantidad de generación de agua (Theses et al., 2018).



### **3- Metodología de trabajo**

Debido a que en República Dominicana no existen aplicaciones de plantas desalinizadoras de agua salada para comunidades de bajos recursos, y en la recopilación de información sobre esta aplicación, existen muy pocas referencias que incluyen un modelado matemático de una planta desalinizadora, se tiene una combinación de estudio exploratorio y experimental porque se busca realizar una intervención en una población, para mejorar su calidad de vida y, porque, la creación tanto del documento del proyecto como la construcción del prototipo y sus implicaciones de investigación, aportarían al desarrollo de estas aplicaciones de plantas desalinizadoras a pequeña escala, ya que son aplicaciones a gran escala para suplir a países con mayor densidad poblacional que la República Dominicana.

#### **3.1- Instrumentos y Equipos**

Para la formulación de este anteproyecto se contempla el uso de las siguientes herramientas:

- SolidWorks: Software CAD de diseño 3D, en el cual se ensamblarán las distintas partes del sistema para su visualización antes de ser armado.
- Cyclepad: Software de simulación de circuitos termodinámicos, en el cual se simuló el funcionamiento del circuito termodinámico de la planta desalinizadora para obtener valores necesarios en los cálculos.

#### **3.2- Procedimiento**

1. En primer lugar, se recopiló información sobre los distintos sistemas de desalinización existentes; esta también fue provista por los profesores involucrados en el proyecto, con los cuales se tuvo una conversación de los requerimientos y necesidades del proyecto, para entender la problemática que abarca la creación de este prototipo.
2. Luego se realizó una lectura comprensiva de los textos académicos con el fin de definir el tipo de sistema a utilizar en el prototipo, de aquí se decidió utilizar el sistema MSF del que ya se ha hablado.
3. Después, se empezaron a plasmar las ideas en un documento, empezando por los objetivos generales y específicos del proyecto. En este caso, los objetivos del proyecto van acorde con las necesidades y requisitos del prototipo a construir, lo cual permitió una delimitación clara de este para realizar los demás conceptos como el alcance del proyecto.

4. Se realizó una reunión con los participantes del proyecto para definir los componentes a utilizar y el diseño del sistema del prototipo en base a los objetivos planteados. Con esta información, se realizó una simulación del funcionamiento del sistema en el software Cyclepad para obtener datos necesarios para los cálculos.
5. Se realizaron dos visitas a Monte Cristi para evaluar la zona en donde se va a instalar el prototipo y se pudo indagar más sobre las condiciones de vida de sus habitantes, con el fin de realizar un diseño apto para sus necesidades.
6. Luego de la obtención de estos resultados, se calculó el área superficial mínima necesaria para producir el calor necesario para evaporar el agua de mar, el diámetro mínimo necesario para las tuberías, y la bomba a utilizar.
7. Por último, se realizó un diseño preliminar del sistema en SolidWorks, la selección de materiales y componentes específicos para realizar un presupuesto aproximado del costo del prototipo a construir.

### 3.3- Selección de componentes

Luego de comprender el funcionamiento básico de este sistema, explicado en la sección 2.2.2, y observar el diagrama de conexión de la misma sección, para el funcionamiento de este sistema se necesitan los siguientes componentes:

Tabla 1: Componentes del proyecto y su función

Componente	Función
Bomba	Succionar agua de mar a la torre de almacenamiento principal
Tinaco de recolección de agua de mar	Almacenar el agua de mar que será suplida al sistema
Tinaco de recolección de agua dulce	Almacenar el agua dulce que sale del sistema
Unidad de evaporación condensación	Corazón del sistema, basado en la evaporación/condensación multietapa
Calentador solar	Calentar el agua de mar a la temperatura necesaria
Paneles solares	Suplir energía principalmente a la bomba, y cualquier otro componente no primario que lo necesite.
Tuberías	Interconexión de componentes del sistema
Llave	Controlar el caudal del tinaco que suple al sistema.

### 3.4- Base de cálculos

Para este proyecto se ha decidido producir 1 m<sup>3</sup> de agua diario, el cual se producirá de 11 A.M. a 4 P.M., debido a que en estas 5 horas de sol se presenta una mayor intensidad de radiación. Para el cálculo del flujo másico se utilizó un volumen de 2.5 m<sup>3</sup> de agua de mar porque 1 m<sup>3</sup> de agua dulce es el 40%, que es el porcentaje estimado de evaporación de agua para el sistema.

Para la primera parte de los cálculos, se utilizará el software Cyclepad mediante el cual se modelan circuitos termodinámicos, con el fin de obtener la cantidad de calor que el sistema debe producir para evaporar el agua de mar.

Para obtener el flujo másico:

$$5 \text{ horas de sol} \rightarrow 18000 \text{ segundos}$$

$$\rho_{\text{mar}} = 1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{MetAs \& Metrólogos Asociados, 2010})$$

$$\rho_{\text{mar}} = \frac{m_{\text{agua}}}{V} \rightarrow m_{\text{agua}} = \rho_{\text{mar}} \cdot V$$

$$m_{\text{agua}} = \left(1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (2.5 \text{ m}^3)$$

$$m_{\text{agua}} = 2567.5 \text{ kg}$$

$$\dot{m} = \frac{m_{\text{agua}}}{t} = \frac{2567.5 \text{ kg}}{18000 \text{ s}}$$

$$\dot{m} = 0.1426 \text{ kg/s}$$

Para calcular la presión con la que bajará el agua del primer tinaco utilizamos la fórmula:

$$P = \rho gh$$

En donde:

$$\rho_{\text{mar}} = 1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

Sustituyendo:

$$P = \left(1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (2 \text{ m}) P = 20149.74 \text{ Pa} P \approx 20.15 \text{ kPa}$$

Para el circuito de la figura 5 se tienen los siguientes componentes:

- SOURCE1: simula la entrada de agua de mar al sistema, como indica su nombre es la fuente de entrada del sistema.
- HX1: sus siglas significan “heat exchanger”, este es el intercambiador de calor, mediante el cual se va a condensar el vapor de agua para la obtención de agua dulce.
- HTR1: el “heater” en este caso es el calentador solar que se utilizará en el sistema
- SPL1: el “splitter” simula el divisor del agua y del vapor. Por un lado, al fondo del tanque, se tiene la salmuera con un mayor grado de salinidad con el que entró, y por el otro lado, la salida de agua dulce luego de que el vapor de agua se condensa.
- Salmuera: este “sink” simula la salida de agua con mayor grado de salinidad.
- Agua dulce: este segundo “sink” simula la salida de agua dulce que se recolectará.

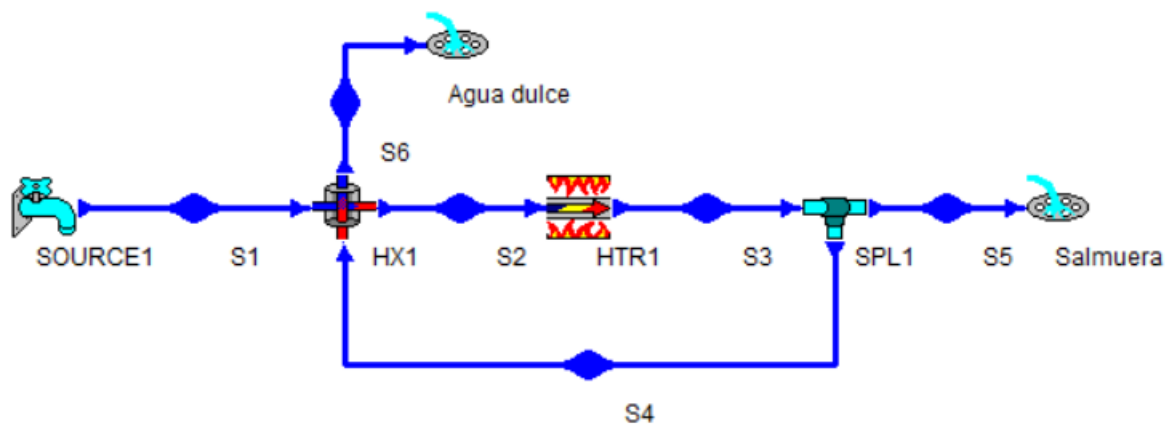


Figura 5. Simulación del sistema en Cyclepad.

Luego de haber obtenido los valores iniciales del primer estado termodinámico y armar el circuito termodinámico en Cyclepad, se realiza la modelación de los componentes, como se observa en las figura 6:

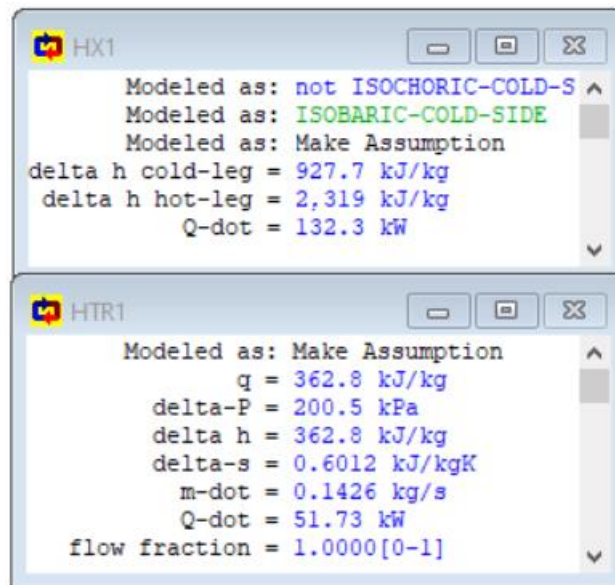


Figura 6. Modelado de componentes en Cyclepad.

Para el intercambiador de calor (HX1), se modela el lado frío como isobárico, es decir, que funcionará a presión constante. Esta parte del prototipo será la tubería en forma de V escalonada, que funcionará como el condensador de vapor y el agua estará fluyendo a presión constante, desde el tinaco de recolección de agua de mar. En cuanto al calentador solar (HTR1) no se colocó una asunción de funcionamiento isobárico porque este componente funciona en un rango de presión especificado por el fabricante.

Luego de modelar los componentes, el siguiente paso es introducir los datos numéricos que nos pide el software. Estos datos introducidos se ven de color verde y los azules son dados por el software, ya que este va solucionando los estados termodinámicos a medida que se introducen estos valores.

Introducción de datos en cada estado:

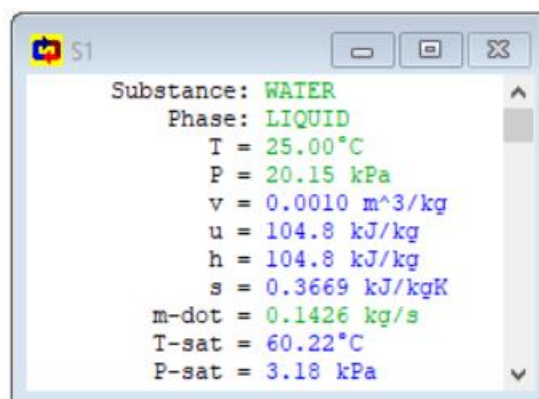


Figura 7. Estado S1.

En el estado S1 se introdujo el fluido con el que vamos a trabajar (agua) y su fase inicial (líquida), se colocó una temperatura de 30 °C, que es una temperatura estimada a la que se encontrará el agua de mar, y la presión calculada anteriormente de 20.15 kPa. Por último, se introdujo el flujo másico obtenido anteriormente en los cálculos iniciales. En este primer estado, el agua se encuentra en el primer tinaco de recolección de agua de mar, la cual va a bajar por gravedad a las tuberías.

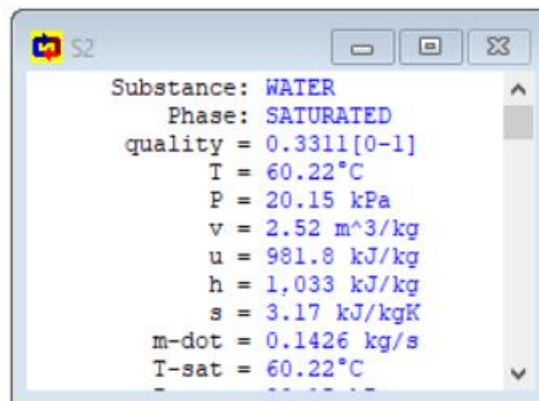


Figura 8. Estado S2.

El segundo estado termodinámico (S2) fue completamente resuelto por el software, no fue necesario introducir ningún valor. En este segundo estado, el agua se encuentra transitando las tuberías entre el intercambiador de calor y el calentador solar.

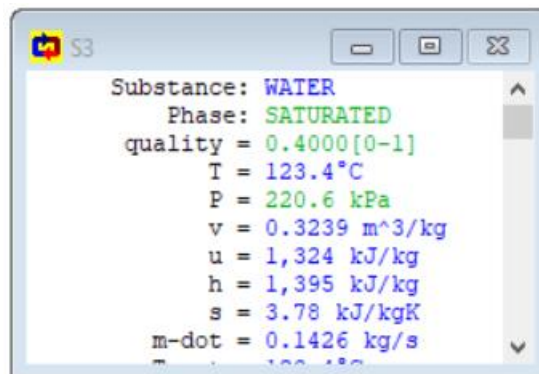


Figura 9. Estado S3.

En el estado S3, se colocó una fase saturada del agua con calidad 0.4, lo cual significa que se evapora un 40% del agua de sal que se encuentra dentro de la cámara de evaporación. Para el valor de la presión, se tomó como referencia un calentador solar comercial que funciona en un rango de presión de 30 – 35 psi. Se seleccionó 32 psi como valor intermedio y se convirtió a



kPa para introducirlo en el software. En este estado, el agua de mar se encuentra a una temperatura bastante alta y va a entrar a la cámara de evaporación.

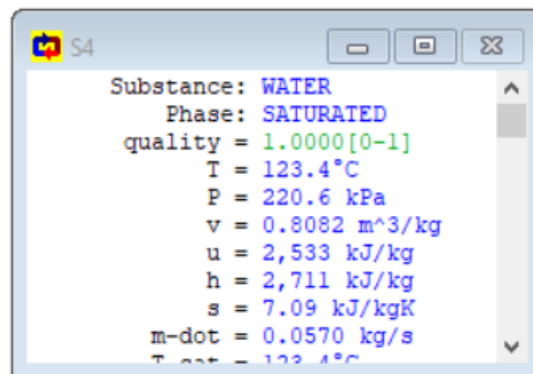


Figura 10. Estado S4.

En S4 solo se colocó la calidad del agua; este valor se debe a que dentro de la cámara de evaporación se mantendrá una cama de agua que no se evaporará, sino que tendrá una velocidad lenta para permitir la evaporación de la superficie. Este estado representa el agua evaporada, y en el resultado de flujo másico se puede observar que se evapora el 40% de la salmuera debido a que el 40% de 0.1426 kg/s es 0.0570 kg/s.

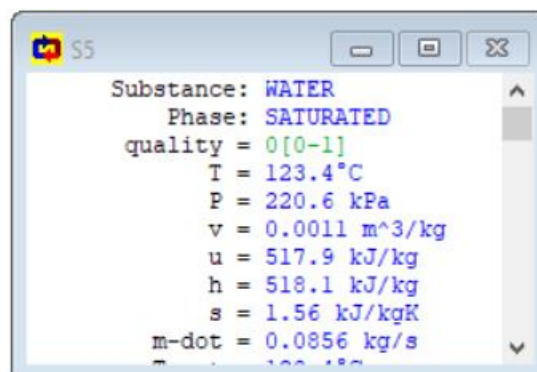


Figura 11. Estado S5.

En S5 se colocó una calidad 0 debido a que en esta parte del sistema se expulsa el agua con alto contenido de sal y no se encuentra en estado de mezcla, por ende, es de calidad 0. En esta parte del recorrido del agua en el sistema termina y es expulsada.

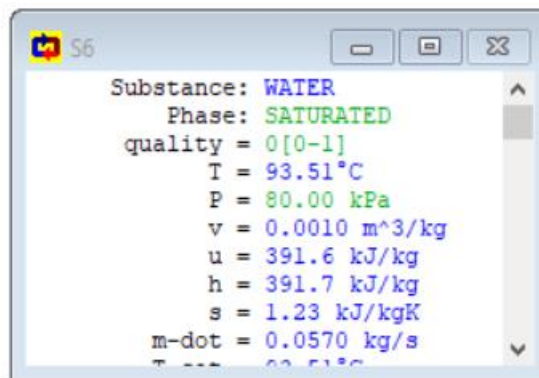


Figura 12. Estado S6.

Para el último estado, S6, se colocó una fase saturada de calidad 0, por la misma razón que el estado S5. En esta parte, se recolecta el agua dulce, la cual no se encuentra en un estado de mezcla. El alto valor de la temperatura se debe al alto valor de la presión, el cual es editable.

Resultados obtenidos:

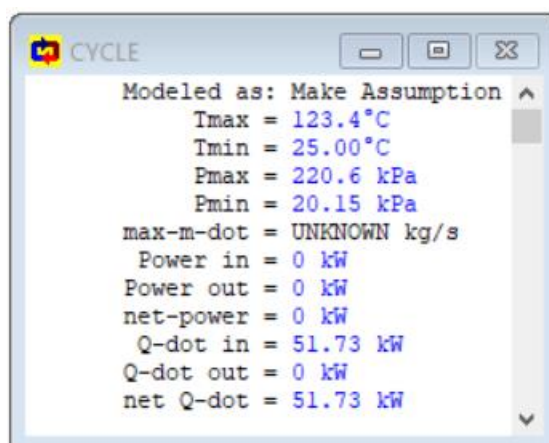


Figura 13. Resultados del ciclo termodinámico.

Como resultado de la simulación del circuito termodinámico de la planta desalinizadora, se obtiene un valor de calor  $Q = 51.73 \text{ kW}$ .

Luego de obtener la cantidad de calor necesaria para evaporar esta cantidad de agua, se necesita calcular el área superficial mínima necesaria para producir esta cantidad de calor en la cámara de evaporación.

Para esto se tiene la siguiente formula:

$$Q = -hA(T_s - T_f)$$

En donde:

$$Q = \text{Calor} = h \times \text{Coeficiente de convección} \times A = \text{Área superficial} \times T_s$$

$$= \text{Temperatura de la superficie} \times T_f = \text{Temperatura del fluido}$$

Datos:

$$Q = 51.73 \text{ kW} = 51,730 \text{ W} = 4000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} T_s = 60^\circ\text{C} = 333.15 \text{ K} \quad T_f = 65^\circ\text{C} = 338.15 \text{ K}$$

Para el coeficiente de convección se tomó un valor intermedio de  $4000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  en base al Anexo 1, en donde se especifica que el coeficiente de convección forzada del agua y líquidos tiene un rango de 50 a  $10,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ .

Despejando la fórmula anterior:

$$A = -\frac{Q}{h(T_s - T_f)} \quad A = -\frac{51,730 \text{ W}}{4000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} (333.15\text{K} - 338.15\text{K})} \quad A = 2.5865 \text{ m}^2 \quad A \approx 2.6 \text{ m}^2$$

Si se asigna un valor arbitrario a la base o altura del área superficial:

$$b = 1.5 \text{ m}$$

Sabiendo que:

$$\text{Área} = \text{base} \times \text{altura} \quad \text{altura (h)} = \frac{\text{Área (A)}}{\text{base (b)}} \quad h = \frac{2.6 \text{ m}^2}{1.5 \text{ m}} \quad h = 1.73 \text{ m} \quad h \approx 1.7 \text{ m}$$

Obtenemos unas dimensiones de área superficial de  $1.5 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$ , para producir un calor de  $25,990 \text{ W}$ . Se asigna una profundidad de  $2.5 \text{ m}$ , y de esta manera se obtienen las dimensiones mínimas para la cámara de evaporación del sistema.

*Cálculos para el diámetro de la tubería:*

Tomando en cuenta que se necesita un primer tinaco con capacidad de  $2,500 \text{ L}$ , se buscó un catálogo de tinacos para obtener el valor de altura de este. Los datos que se tienen son los siguientes:

$$\dot{m} = 0.1426 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\rho_{mar} = 1027 \frac{kg}{m^3}$$

Calculando el caudal que va a fluir en la tubería:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{mar}$$

Despejando Q:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_{mar}}$$

Sustituyendo valores:

$$Q = \frac{0.1426 \frac{kg}{s}}{1027 \frac{kg}{m^3}} Q = 1.3885 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Aplicando el Teorema de Torricelli, que nos dice que la velocidad de un líquido en una vasija abierta, por un orificio, es la que tendría un cuerpo cualquiera, cayendo libremente en el vacío desde el nivel del líquido hasta el centro de gravedad del orificio (Meléndez, 2016), se tiene la siguiente ecuación para el cálculo de la velocidad:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Utilizando la altura del tinaco con capacidad de 2,500 L, encontrado en un catálogo, tenemos 1.76 metros de altura total. Aproximando la altura del líquido a la parte superior de este, sin llenarlo completamente, se tiene una altura de 1.20 metros. Sustituyendo los valores de gravedad y altura en la ecuación de velocidad:

$$v = \sqrt{2 \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right) (1.20 m)} v = 4.85 \frac{m}{s}$$

Con la ecuación de caudal  $Q = \text{Área} \times \text{velocidad}$ , se despeja el área y se obtiene el área transversal de la tubería que se necesita:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{1.3885 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{4.85 \frac{m}{s}} A = 2.863 \times 10^{-5} m^2$$

Utilizando la fórmula de área de un círculo  $A = \pi r^2$ , se obtiene el radio de la tubería:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.863 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{\pi}} r = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Calculando el diámetro:

$$D = 2r D = 2(3.02 \times 10^{-3} \text{ m}) D = 6.04 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Convirtiendo este valor a pulgadas, debido a que es la unidad de medida mayormente utilizada en tuberías, se obtiene el siguiente valor a través del análisis dimensional:

$$D = (6.04 \times 10^{-3} \text{ m}) \left( \frac{39.3701 \text{ in}}{1 \text{ m}} \right) D = 0.2377 \text{ in}$$

Este resultado quiere decir que se necesita una tubería con un diámetro mínimo de 0.2377 pulgadas.

*Cálculos para la bomba:*

Para la bomba, empezamos con la ecuación de Bernoulli, que expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido (Meléndez, 2016). Se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_L + h_A = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

En donde:

$$P = \text{Presión} \quad \gamma = \text{Peso específico} \quad z = \text{Altura} \quad h_L = h_A = \text{Altura dinámica de la bomba} \\ = \text{gravedad} \quad v = \text{velocidad}$$

La parte izquierda de la ecuación representa el agua de mar, la cual tiene presión 0 por encontrarse a condiciones atmosféricas y velocidad 0, y como se toma su superficie como punto de referencia para la altura, también es 0, por lo que son variables que se cancelan. Del lado derecho se representa el agua de mar recolectada en el tinaco, la cual tendrá las mismas condiciones de presión y velocidad 0, por lo que, también, se cancela. Como resultado se tiene la siguiente ecuación:

$$h_A = z_2 + h_L$$

En esta ecuación,  $z_2$  representa la altura desde la superficie del agua hasta el punto más alto del tinaco.

Tanto en el área de succión como en el área de descarga del sistema se tienen pérdidas por accesorios y longitud de un total de  $h_L = 1.90 \text{ m}$ .

Se tomó un valor de 5 metros para  $z_2$ , el cual es un valor mayor a la altura estimada, por factor de seguridad y poder tener un rejuego con la altura del tinaco y posicionamiento de la tubería. Entonces:

$$h_A = 5 \text{ m} + 1.9 \text{ m} h_A = 6.9 \text{ m}$$

Calculando la potencia hidráulica de la bomba:

$$P_H = Q \cdot h_A \cdot \gamma_{\text{agua mar}}$$

Para el caudal se tiene un volumen de 2,500 L y se colocó un tiempo de 40 minutos para llenarlo:

$$40 \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 2400 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{2500 \text{ L}}{2400 \text{ s}} = 1.042 \frac{\text{L}}{\text{s}} Q = \left( \frac{1.042 \text{ L}}{\text{s}} \right) \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) Q = 0.00104 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Peso específico del agua de mar:

$$\gamma = s_g \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \gamma = (1.03) \left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \gamma = 10,104.3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Sustituyendo en la ecuación de potencia de la bomba:

$$P_H = \left( 0.00104 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) (6.9 \text{ m}) \left( 10,104.3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) P_H = 72.508 \text{ Watts}$$

Dividiendo entre la eficiencia de la bomba (se toma un valor de 70% asumiendo el peor escenario):

$$P_H = \frac{72.508 \text{ W}}{0.7} P_H = 103.58 \text{ W}$$

Convirtiendo el valor a caballos de fuerza:

$$P_B = \frac{103.58 \text{ W}}{745.6} P_B = 0.1389 \text{ HP}$$



Se necesita una bomba de  $\frac{1}{2}$  HP, ya que este es el valor comercial más pequeño que se puede conseguir. Además, para la succión se utilizará un diámetro de tubería de  $1 \frac{1}{2}$  pulgada y para la descarga y el resto del sistema, un diámetro de 1 pulgada.

### 3.5- Selección de materiales

Los componentes que requieren una selección de materiales son las tuberías, cámara de evaporación y tolva. Para la cámara de evaporación se seleccionó el acero inoxidable 316, esta decisión se tomó en base a la revisión de literatura para el marco teórico, en donde se encontró que es el material utilizado en las plantas de desalinización MSF y también fue consultado y aprobado por profesores que forman parte del proyecto.

En cuanto a las tuberías se seleccionó PVC para las que van conectadas a la bomba y al tinaco de recolección de agua de mar, polietileno de alta densidad (HDPE) para la conexión de la tolva y el tinaco de depósito de agua dulce y acero inoxidable 316 para las demás tuberías, cámara de evaporación y tolva.

### 3.6- Diseño del prototipo: primera idea

En la figura 14 se muestra una vista previa del prototipo a realizar. Se tiene que el tinaco que se encuentra en la plataforma es en donde se va a recolectar el agua de mar, que va a bajar por la tubería en forma de V que está justo encima de la tolva, el agua seguirá su recorrido hacia el calentador solar, y de este saldrá a la cámara de evaporación, en donde se evaporará el agua, dejando una cama de salmuera alta en sales, y el condensado se recolectará en el tinaco que se encuentra en el piso. Es importante aclarar que en este prototipo se está modelando el funcionamiento de una planta desalinizadora MSF, la cual cuenta con múltiples etapas en aplicaciones comunes, con la diferencia de que este será de una sola etapa. Se realiza esta salvedad para diferenciarla del sistema SSD explicado en la sección 2.2.4.

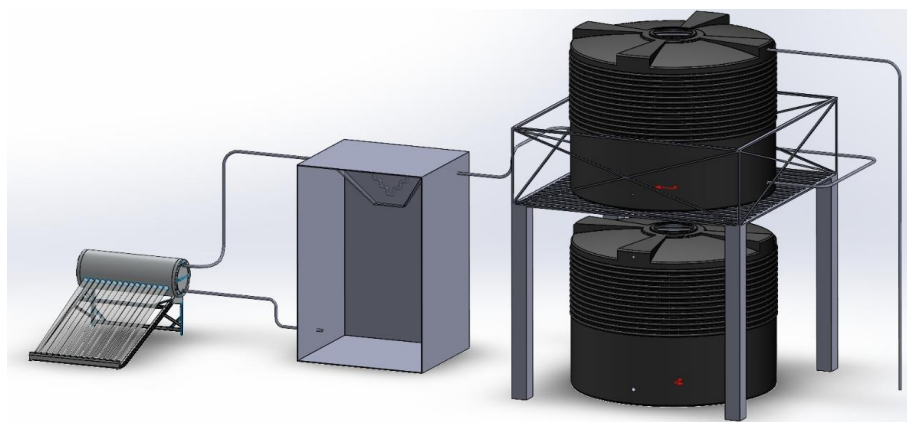


Figura 14. Diseño del prototipo.

#### 4- Planos generales para la construcción de la unidad de evaporación condensación

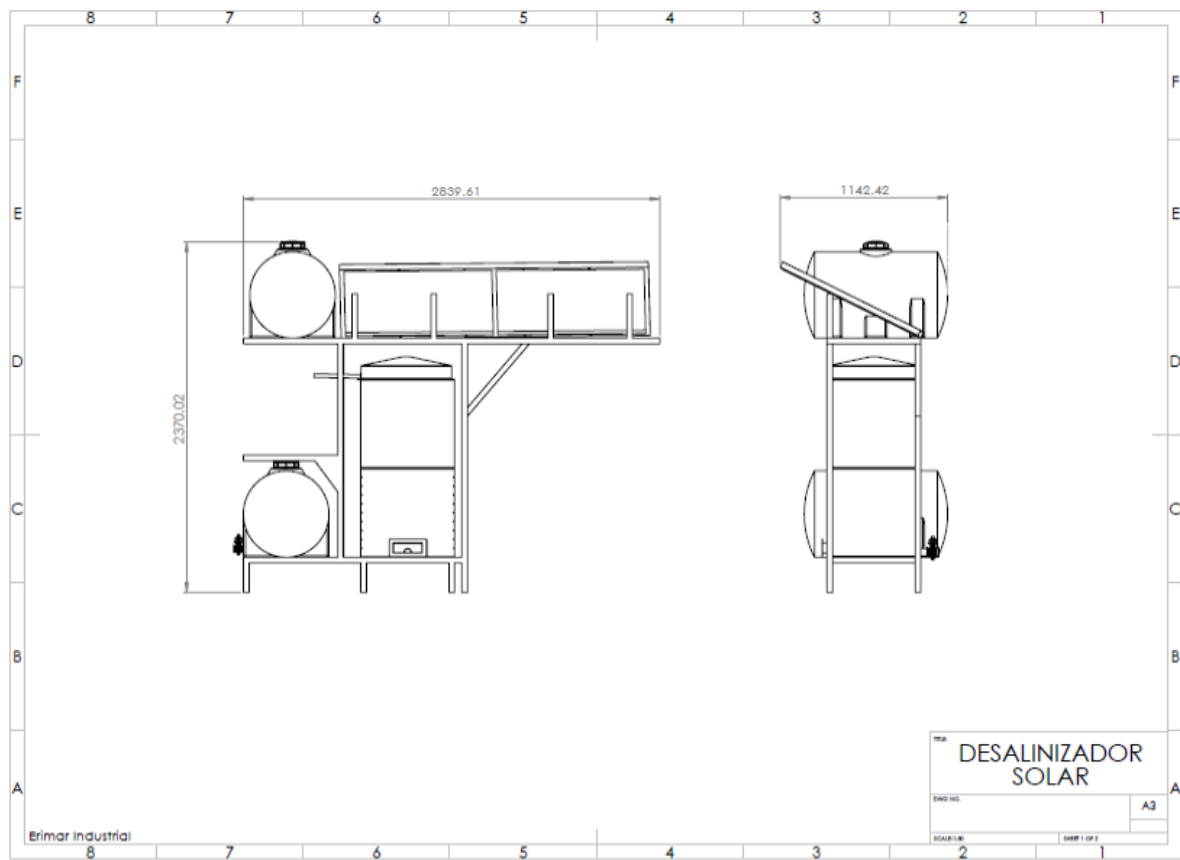


Figura 15. Vista en planta del prototipo.

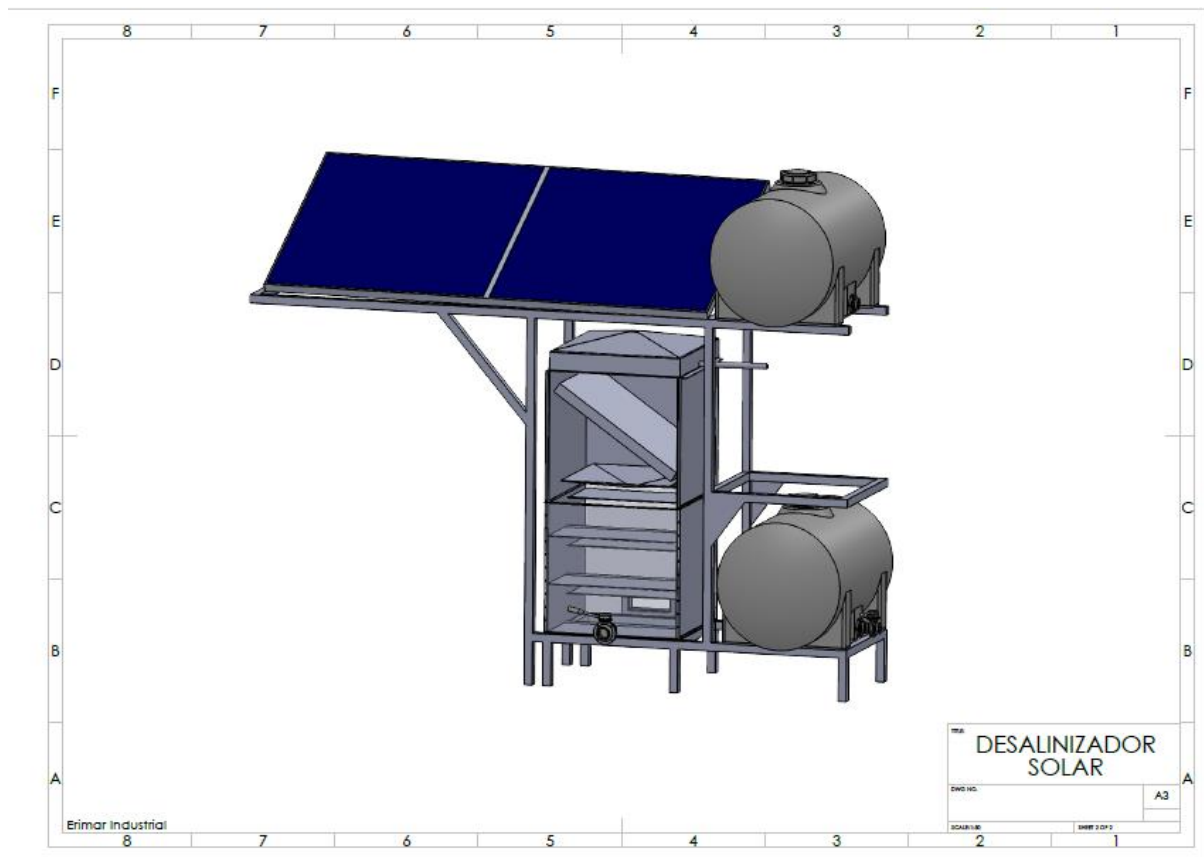


Figura 15. Corte en planta del prototipo.

## 5- Referencias bibliográficas

- Al-Fulaij, H. F. (2011). Dynamic modeling of multi stage flash (MSF) desalination plant. *UNiversity College London (UCL)*, July, 334.
- EngineersEdge. (2017). *Convective heat transfer Coefficients table chart*. 19–19, 19–26. [https://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/convective\\_heat\\_transfer\\_coefficients\\_\\_13378.htm](https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm)
- Gómez, O. (2018). *Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable*.
- Khraisheh, M., Inamdar, M., Almomani, F., & Adham, S. (2022). Humidification–Dehumidification (HDH) Desalination and Other Volume Reduction Techniques for Produced Water Treatment. *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010060>
- Li, Y., Chen, X., Xu, Y., Zhuo, Y., & Lu, G. (2021). Sustainable thermal-based desalination with low-cost energy resources and low-carbon footprints. *Desalination*, 520(September),

115371. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115371>

Libotean, D. M. (2008). *Modeling the Reverse Osmosis Processes Performance Using Artificial Neural Networks*.

Meléndez, M. (2016). *Introducción a la Mecánica de Fluidos* (F. Rosario (ed.)). Editora Búho.

MetAs & Metrólogos Asociados. (2010). Densidad del Agua. *La Guía MetAs*, 06, 2. <https://www.experimentoscientificos.es/densidad/densidad-agua/>

Theses, A. E., Proetto, B., & Proetto, B. (2018). *Single-Stage , Venturi-Driven Desalination System*. <https://doi.org/10.25777/tzck-4w96>

## **6- Dificultades y perspectivas**

Ha existido demora en la ejecución del proyecto por problemas técnicos. Se avanza en la construcción de la instalación que se espera concluir para el mes de enero del 2023.

Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)



**Propuesta Técnica y Económica para la conceptualización,  
diseño y construcción de un prototipo escalable para desalación  
de aguas marinas y salobres con tecnología termo solar de baja  
capacidad para zonas rurales.**

Informe-02

Santo Domingo, República Dominicana

31 marzo 2023



## 1- Alcance del informe

El presente informe responde al Producto 2 (resultados del prototipo construido y funcional con pruebas de laboratorio certificadas) del proyecto “Propuesta Técnica y Económica para la conceptualización, diseño y construcción de un prototipo escalable para desalación de aguas marinas y salobres con tecnología termo solar de baja capacidad para zonas rurales”.

## 2- Montaje del sistema de desalinización de agua en la plataforma experimental de INTEC.

El sistema de desalinización solar de agua se montó en la plataforma experimental de INTEC del 2 al 11 de marzo del 2023. La figura 1 muestra una vista frontal del equipo y los detalles de sus componentes.



Figura 1: Desalinizador solar en la plataforma experimental del INTEC. T1: Tanque de agua salada; T2: Tanque de agua destilada; DS: Desagüe de salmuera; CC: Cámara de condensación; CE: Cámara de evaporación; CS: Calentador solar; PS1: Paneles solares para la alimentación de la bomba de agua; PS2: Panel solar para la alimentación del soplador del T2.

Durante la prueba en la plataforma del INTEC no se montó la bomba de agua, aunque se verificó su funcionamiento con los paneles solares (PS1). Las pruebas se realizaron con agua de la red. El tanque de agua salada (T1), que cuenta con un flotante para controlar el llenado con 500 litros, se llenó con una manguera desde una válvula de agua de la red urbana. En modo convencional de funcionamiento, el agua del tanque T1 pasa al serpentín de precalentamiento de agua ubicado en la cámara de condensación (CC). El agua precalentada sale de CC y entra al calentador solar (CS) donde se calienta hasta la temperatura de trabajo. Del CS el agua pasa a las bandejas de la cámara de evaporación donde el vapor sube a la cámara de condensación y el agua salada descende por los platos de la CE hasta que sale por el desagüe de salmuera (DS). El vapor sube a la cámara de condensación donde al entrar en contacto con el serpentín de enfriamiento y con las paredes de la CC condensa y pasa al tanque de agua destilada (T2). Una vez que el sistema se instale en su destino final, la salmuera se acumulará en el reservior de la salina.

Para el control de parámetros del piloto se instalaron 5 termopares analógicos en T1, a la salida del serpentín de la CC, en el CS, a la entrada de la CE y en la CC. La figura 2 muestra los 5 termopares.

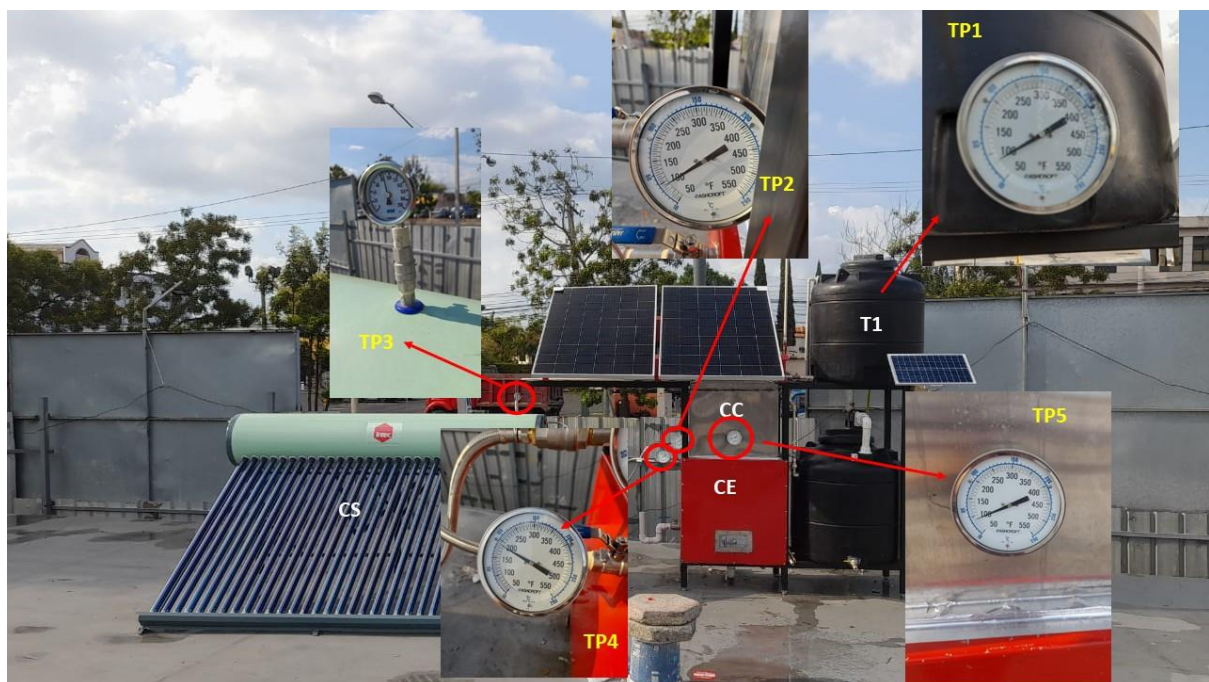


Figura 2: Termopares analógicos para la medición de la temperatura. TP1: termopar en el T1 (en la parte de atrás del tanque); TP2: termopar a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); TP3: termopar en el CS; TP4: termopar a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: termopar en la CC.

### 3- Evaluación del sistema de desalinización de agua en la plataforma experimental de INTEC.

El sistema de desalinización inició a funcionar el 22 de marzo del 2023, coincidiendo con el día mundial del agua. Las pruebas se realizaron los días 23, 24 y 27 de marzo. Las tablas 1-5 muestran los resultados de las pruebas por día. Para las pruebas el tanque de entrada se llenó de agua potable de la red de distribución. En cada tabla se muestra el valor de la calidad del agua al inicio y al final del proceso, medido con ayuda de un medidor multiparámetros, Hach el HQ40d, en el Laboratorio de Servicios Ambientales del INTEC.

La tabla 1 muestra las condiciones de operación y la eficiencia del proceso de destilación. Los ensayos se realizaron por un período de tiempo de 105 a 170 minutos, siempre en hora de la tarde, entre 2 y 5:30 pm (Tablas 2-4), lo que indica que se tiene una reserva importante en la operación del equipo para aprovechar el horario matutino. En todos los casos se operó a bajo flujo entre 1,471 y 2,019 L/min.

Tabla 1: Condiciones de operación y eficiencia en la recuperación de agua

Parámetro	23/3/2023	24/3/2023	27/3/2023	Promedio
Tiempo de operación, min	105	135	170	
Tiempo para iniciar la destilación, min	20	25	19	
Flujo de agua en DS, L/min	2,019	1,615	1,471	
Flujo de agua destilada, L/min	0,267	0,237	0,176	
Volumen de agua tratada, L	240	250	280	
Volumen de agua destilada, L	28	32	30	
Eficiencia de la destilación, %	11,67	12,80	10,71	11,73±1,04

Respecto a la eficiencia de destilación se considera baja (entre 10,71 y 12,80), inferior al valor estimado de diseño (entre 20-25 %). Se debe destacar que ninguno de los ensayos se realizó con el soplador funcionando, lo que garantiza en el sistema una diferencia de presión que favorece que favorecerá el desplazamiento del vapor de agua de la cámara de evaporación a la cámara de condensación. Estas reservas en la operación se verificarán en el nuevo emplazamiento del prototipo, donde se trabajará con agua salada. Otro elemento a tener en cuenta es la mejora de la condensación, lo que deberá evaluarse para la nueva versión del prototipo, a través del aumento de la superficie de respuesta en el serpentín interno del condensador y en el aumento de la superficie de transferencia de calor en las paredes externas de la cámara de condensación.

Las tablas 2-4 muestran los perfiles de temperatura en cinco puntos del desalinizador. La temperatura del tanque de alimentación (T1) se mantuvo estable alrededor de los 30 grados todos los días y durante el período de ensayo. La temperatura a la salida del intercambiador de calor de la cámara de condensación osciló, principalmente, entre 40 y 48 °C, para una diferencia con la temperatura de entrada de 10-18 °C, funcionando como sistema de precalentamiento a la entrada del calentador solar. Durante el tercer día de operaciones en los primeros 20 minutos de operación se observó un comportamiento diferente de la temperatura, al oscilar entre 55 y 60 °C, lo que pudiera justificarse por un fuerte golpe térmico debido a la alta temperatura del agua y vapor a la entrada de cámara de condensación (96 °C)

Tabla 2. Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 23 de marzo del 2023.  
. T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
15:00	30	30	90	35	25
15:15	30	40	84	90	45
15:30	30	45	82	88	47
15:45	30	45	82	90	47
16:00	30	45	82	88	45
16:10	30	44	82	86	47
16:20	30	44	80	86	48
16:30	30	44	80	84	47
16:45	30	44	80	82	47

Tabla 3. Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 24 de marzo del 2023.  
. T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
14:00	30	30	86	34	30
14:15	30	48	84	86	50
14:30	30	46	84	86	46
14:45	30	46	84	84	46
15:00	30	44	82	84	46
15:20	30	44	82	82	46
15:40	30	44	82	82	44
15:55	30	42	80	82	44
16:15	30	42	80	80	42

Tabla 5. Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 27 de marzo del 2023.  
. T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
14:35	30	30	96	35	30
14:45	30	65	94	98	80
14:55	30	50	93	94	47
15:15	30	45	92	90	47
15:40	30	47	90	86	44
16:05	30	47	89	88	44
16:40	30	45	88	86	44
17:10	30	45	88	84	42
17:25	30	42	86	82	40

En cuanto a la temperatura en el calentador solar (T3), la misma estuvo en el rango y por encima del valor de diseño del fabricante (80-90 °C), disminuyendo durante la operación hasta un valor de 80 °C. Se espera que durante una operación por más tiempo este valor disminuya, pero deberá evaluarse en los estudios en el nuevo emplazamiento. Por tanto, la temperatura a la entrada de la cámara de evaporación (T4) se mantuvo todo el tiempo por encima de los 80 °C, valor que debe garantizar una buena evaporación de vapor de agua. Por último, la temperatura en la cámara de condensación (T5) osciló entre 40 y 50 °C, lo que indica un cambio importante de temperatura respecto a la temperatura de vapor de agua que debe estar cerca de la temperatura en la cámara de evaporación (80-90 °C).

El último elemento a evaluar es la calidad del agua. La tabla 6 muestra los valores de conductividad y salinidad del agua de entrada y salida durante los experimentos.

Tabla 6. Calidad de agua antes y después de la desalinización.

Parámetro	23/3/2023	24/3/2023	27/3/2023	Promedio
Conductividad entrada, $\mu\text{S}/\text{cm}$	536	514	604	551,33 $\pm$ 46,92
Conductividad salida, $\mu\text{S}/\text{cm}$	102	46,8	42,3	63,7 $\pm$ 33,24
Salinidad entrada, %	0,26	0,25	0,29	0,27 $\pm$ 0,02
Salinidad salida, %	0,02	0,02	0,02	0,02 $\pm$ 0,00
% de desalinización	92,31	92	93,1	92,47 $\pm$ 0,57

Los dos indicadores fundamentales de calidad del agua desalinizada muestran que el sistema logra una adecuada desalinización, en este caso expresado por la disminución del contenido salino del agua potable utilizada. En el primer día de experimentos la conductividad del agua destilada fue superior casi dos veces a la de los otros días, lo que pudiera explicarse por el arrastre de sales o impurezas depositadas en el equipo, que se empleaba por primera vez. EL porcentaje de desalinización alcanza un valor muy favorable de más de 92 %.

#### 4- Conclusiones

Se concluyó, instaló y se puso en marcha el prototipo de desalinizador solar. Los primeros estudios de evaluación muestran adecuados perfiles de temperatura en el reactor, una eficiencia de destilación del agua cercano al 12 % y una buena calidad del agua destilada con más del 92 % de desalinación.



Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)



**Conceptualización, diseño y construcción de un prototipo  
escalable para la desalinización termosolar de agua salada y  
salobre con tecnología apropiada.**

Informe Final

Santo Domingo, República Dominicana

31 julio 2023

## **Informe final de proyecto**

**Conceptualización, diseño y construcción de un prototipo escalable para la desalinización termosolar de agua salada y salobre con tecnología apropiada.**

**Coordinador del proyecto:** Ulises Jáuregui Haza

### **Equipo técnico:**

Pedro Disla

Juan E. Castellanos

Iván Jiménez

Deyslen Mariano

Kevin María

Randy Capellán

Carlos Sanlley

### **Equipo administrativo:**

Manuel Santana

Francheska Mata

## Contenido

Resumen.....	4
1- Fundamentos del proyecto .....	5
1.1- Planteamiento del problema .....	5
1.2- Hipótesis.....	6
1.3- Objetivos .....	6
1.4- Justificación.....	6
1.5- Alcance.....	7
2. Descripción general .....	8
2.1- Estado del arte .....	8
2.2- Marco teórico.....	10
2.2.1- Clasificación de los procesos de desalinización .....	10
2.2.2- Evaporación Instantánea Multietapa (MSF).....	11
2.2.3- Humificación y deshumidificación (HDH) .....	13
2.2.4- Desalinización de una etapa (SSD) .....	14
3- Metodología de trabajo .....	14
3.1- Instrumentos y equipos.....	14
3.2- Procedimiento.....	15
3.3- Selección de componentes.....	16
3.4- Base de cálculo .....	16
3.5- Selección de materiales .....	27
3.6- Diseño del prototipo: primera idea .....	27
4- Planos generales para la construcción del desalinizador solar.....	28
5- Construcción y montaje del desalinizador termosolar de agua.....	30
6- Puesta en marcha del desalinizador solar en la plataforma experimental del INTEC. ....	31
7- Evaluación del sistema de desalinización de agua en la plataforma experimental de INTEC.....	33
8- Puesta en marcha del desalinizador solar en el Acuario Nacional de la República Dominicana.....	37
9- Evaluación del sistema de desalinización de agua en la plataforma experimental de INTEC.....	38
10- Taller de cierre del proyecto. ....	42
11- Conclusiones .....	43
12- Referencias bibliográficas.....	44

## **Resumen**

En el marco del proyecto “Fortalecimiento de un Micro Ecosistema Replicable para el Desarrollo Acelerado de Tecnologías para la Adaptación al Cambio Climático de la República Dominicana, a través del desarrollo de un proyecto piloto de Desalinización Termosolar con tecnología apropiada”, financiado por el programa de pequeñas subvenciones para la innovación del Fondo de Adaptación, implementado por el IDDI, el INTEC diseñó, instaló y puso en marcha el prototipo de desalinizador termosolar de agua salada. Los estudios de evaluación mostraron perfiles adecuados de temperatura en el prototipo, una eficiencia de destilación del agua entre 12 y 14 %, inferior al valor de diseño, pero se identificó una reserva importante en la mejora de diseño en la unidad de condensación del prototipo. La calidad del agua destilada cumple con los parámetros esperados, alcanzando más del 92 % de desalinización. En los estudios con agua salada se logró una excelente remoción de iones y metales pesados que osciló entre el 30 y el 100 %. Se deberá trabajar en el estudio de la calidad microbiológica del agua destilada, lo que requerirá de más experimentos y del uso de técnicas de análisis cuantitativas.

## **1- Fundamentos del proyecto**

El acceso a agua potable en el mundo cada vez es menor. Se estima que para el 2050 alrededor de 4 mil millones de personas se verán afectados por falta de agua potable. Esta también es una de las amenazas más grande para la sostenibilidad del medio ambiente. Los sistemas de desalinización son alternativas viables que pueden implementarse de diversas maneras dependiendo la necesidad y la localización. Como este proyecto se basará en el desarrollo de un sistema de bajo costo y específicamente termo solar, nos enfocaremos en los diferentes sistemas termo solares para determinar cuál sería más viable (Al-Fulaij, 2011).

Las tres tecnologías más comunes para la desalinización son las de base membrana, de base térmica, y de base electroquímica. Dentro de estas tres, hay más subcategorías de métodos, tales como manejado eléctricamente, con evaporación, etc. Las tecnologías de desalinización tienen en común el consumo intensivo de energía, por lo que la diferencia, aparte del método de generación, está en el costo y para interés de este proyecto, la implementación de energía solar como fuente (Li et al., 2021).

La desalinización a nivel mundial alcanza hoy en día alrededor de 95 millones de metros cúbicos al día, cifra que, aunque parezca abundante no abarca siquiera el consumo de los países del medio oriente que más producen agua a través de estas tecnologías (Theses et al., 2018).

La tecnología de desalinización tiene potencial de convertirse en tecnología líder en áreas de bajos recursos al implementarse con sistemas de energías renovables y a bajo costo. Las zonas rurales o de difícil acceso o zonas áridas y desérticas, en donde tampoco existen depósitos o reservas de agua dulce disponibles para tratar y distribuir para consumo humano, que son fuentes limitadas del líquido, son algunos de los lugares que podrían beneficiarse. En este proyecto se explorará la implementación de un prototipo de desalinización de bajo costo utilizando una de las tecnologías existentes.

### **1.1- Planteamiento del problema**

En las zonas de clima árido que no cuentan con depósitos o reservas de agua dulce, es difícil para las comunidades de escasos recursos conseguir agua potable para realizar sus actividades domésticas diarias y consumo de agua. Este proyecto tiene la finalidad de abarcar esta problemática con una planta de desalinización termosolar y un sistema de evaporación instantánea multietapa o MSF.

## **1.2- Hipótesis**

Es posible producir un metro cúbico diario de agua desalinizada con un prototipo de desalinizador termosolar basado en la evaporación multietapa, de fácil manejo para comunidades costeras que carecen del recurso agua.

## **1.3- Objetivos**

- Construir un prototipo de una planta desalinizadora termosolar basado en un sistema de evaporación instantánea multietapa para la generación distribuida de agua potable basado en la desalinización termo solar con la capacidad de producir 1 m<sup>3</sup> de agua diario.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Identificar los elementos técnicos para el diseño y el cálculo de una desalinizadora termo solar para producir 1 m<sup>3</sup> de agua diario.
- Diseñar un prototipo de desalinizadora termo solar para producir 1 m<sup>3</sup> de agua dulce.
- Construir un prototipo sencillo capaz de ser operado por una persona no experta.
- Validar el funcionamiento del prototipo construido en una zona costera con agua salada.

## **1.4- Justificación**

Dentro de los diferentes tipos de sistemas de desalinización termo solar, se encuentran principalmente los sistemas Evaporación Instantánea Multietapa (MSF), Ósmosis Inversa (RO) y Destilación Multiefecto (MED). Cada uno cuenta con un requerimiento promedio de consumo de energía por cada m<sup>3</sup> de agua potable que produce. El sistema RO consume entre 3.5 a 5.5 kWh · m<sup>-3</sup> de electricidad, el MSF entre 2.5 a 3.5 kWh · m<sup>-3</sup>, y el MED entre 1.5 a 2.5 kWh · m<sup>-3</sup>. Ambos el MSF y el MED requieren adicionalmente 290 kJ/kg de energía por cada m<sup>3</sup>. Estos valores nos ayudan a plantear inicialmente una comparación energética y la viabilidad que tendrían en la Republica Dominicana, que al necesitarse en zonas de bajos recursos inmediatamente nos llama la atención los sistemas MSF y MED por requerir menos electricidad (Li et al., 2021).

En los sistemas termo solares la energía eléctrica se suministra a través de fuentes de energías renovables fácilmente. Con esto también el sistema tendrá una huella de carbono mucho menor. Entre los sistemas MED y MSF se encuentran los más comunes para la utilización de energías



renovables como fuente, sin embargo, a estas ser intermitentes se requieren sistemas de almacenamiento de energía para lidiar con este problema (Li et al., 2021).

Debido a que el requerimiento de agua dulce del proyecto es de 1 m<sup>3</sup>, un sistema eficiente como el caso del sistema MSF sería la opción más adecuada porque es uno de los que consume menor energía y son modificables para el uso de energía renovable.

Actualmente en la República Dominicana, las condiciones de suministro de agua potable por parte del estado dominicano no son favorables. Las ciudades principales cuentan con interrupción en el servicio de agua por escasez, averías, entre otros siniestros. Peor aún es la situación en las afueras de la ciudad o en zonas rurales del país, donde no existen sistemas de distribución de agua potable y en donde los habitantes dependen de ríos y fuentes externas. Un sistema de desalinización puede ser una alternativa para las zonas costeras de la República Dominicana que están poco desarrolladas.

El proyecto responde al objetivo 6 (Agua limpia y saneamiento) de los Objetivos de Desarrollo Sostenible al 203; al eje 4 de la Estrategia Nacional de Desarrollo de la República Dominicana y a la estrategia de adaptación de los NDC.

### **1.5- Alcance**

Este prototipo podrá ser instalado en comunidades costeras que requieran diferentes servicios básicos, como el agua potable para el uso doméstico de sus habitantes. Por esta razón el prototipo tiene que ser de bajo costo para poder ser adquirido por la comunidad. Tiene que aprovechar al máximo la cantidad de agua salada de mar, generando así la mayor cantidad de agua dulce posible. Igualmente, debe ser fácil de operar por una persona que no sea experta, por ende, tiene que ser fácil de entender y utilizar.

## **2. Descripción general**

El agua potable muy bien puede considerarse como el recurso más importante para la humanidad, y el acceso a la misma no está garantizado. En muchas zonas de bajos recursos el agua potable es inexistente y sus habitantes sobreviven con agua contaminada o agua obtenida ineficientemente al depender de ríos u otras fuentes. La necesidad de soluciones autosustentables, económicas, y limpias son más que inevitables.

Las pequeñas islas del Caribe tienen grandes obstáculos a la hora de suplirse con productos de necesidades básicas. Ya que son islas pequeñas, no cuentan con la geografía de otros países tales como tierra vasta para cultivar o sistemas de ríos y generalmente por obligación tienen un gasto elevado de importación para estos insumos.

En este proyecto se construirá un prototipo modular, para fines de fácil transportación, de generación distribuida de agua potable basado en la desalinización termo solar con la capacidad de producir 1 m<sup>3</sup> de agua diario, con el fin de analizar la posibilidad de aplicar este sistema u otros similares para una solución permanente a un problema que afecta a millones de personas alrededor del mundo, entre ellos a nuestro país. Se aclara que para fines de prototipo se trabajara en aplicar la tecnología de una planta multi etapa, pero solamente con una etapa. Esto conlleva una adaptación en el tema energético y también una diferencia en generación de agua al compararse con una planta de varias etapas, sin embargo, demostrar esta tecnología es el primer paso hacia una solución viable y permanente para una problemática tan amplia.

### **2.1- Estado del arte**

En muchas zonas áridas costeras y no costeras, al igual que también en pequeñas islas, la desalinización puede muy bien ser la única solución viable para la producción de agua potable. En el mundo, la adopción de la tecnología de desalinización, especialmente en los países del golfo Pérsico, ha crecido bastante desde sus inicios en la década de los 1950s (Li et al., 2021).

Los países del golfo Pérsico generan el 50% del agua a través de la desalinización de toda la industria global, lo que los hace líderes del mercado. Desde los años 80, estos países han utilizado el agua obtenida de la desalinización como fuente principal para uso doméstico, industrial y agricultura. Específicamente, las plantas MSF (Evaporación Instantánea Multietapa) son las más utilizadas en el medio oriente. Las razones principales son su alta capacidad de generación de agua dada una eficiencia térmica relativamente alta, lo cual se traduce en un mejor rendimiento con menores costos. Hoy en día las plantas MSF del medio

oriente generan una cantidad por unidad que ronda entre los 50,000 m<sup>3</sup> a 75,000 m<sup>3</sup> diarios, con entre 2-12 unidades de producción (Al-Fulaij, 2011).

Aunque existen plantas de desalinización tipo MSF, solo a gran escala se encuentran en el medio oriente.

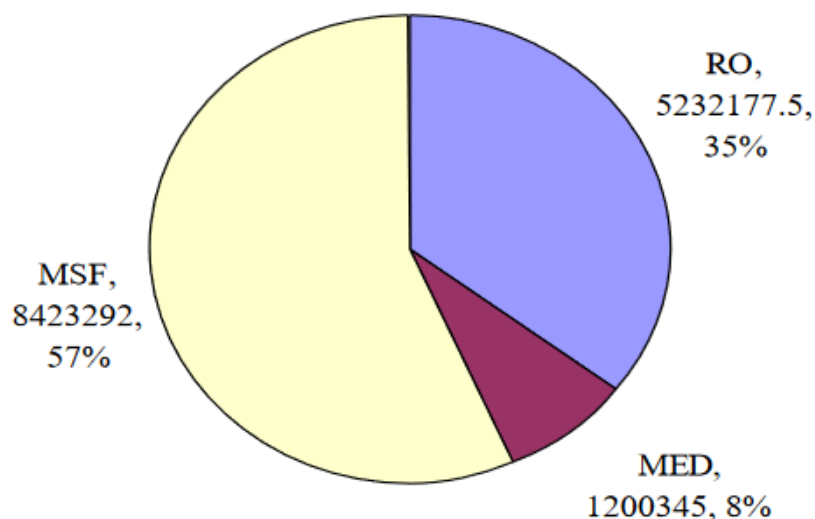


Figura 1. Distribución de mercado de desalinización a través del uso de agua de mar (Al-Fulaij, 2011).

Para dar a conocer un poco la magnitud de estas grandes plantas se pueden mencionar algunos de los ejemplos de plantas existentes. En el año 2009 se instaló una planta MSF en Shoaiba (Arabia Saudita), que cuenta con 12 unidades que producen 73,645 m<sup>3</sup> diarios cada una con un total de 22 etapas individuales en cada unidad. Esta planta en su totalidad produce 883,742 m<sup>3</sup> de agua diario, siendo una de las plantas más grandes del mundo (Al-Fulaij, 2011).

Por otro lado, la tecnología de osmosis inversa es la más popular y utilizada alrededor del mundo fuera de la desalinización de agua de mar, que como se mencionó la tecnología MSF es la que domina. La tecnología de membrana se utiliza generalmente para tecnologías de tratamientos de agua ya que la aplicación de la misma alcanza a remover constituyentes tales como sólidos disueltos, carbón orgánico, iones inorgánicos, entre otros compuestos orgánicos (Libotean, 2008).

La osmosis inversa es utilizada para generar agua potable y agua ultrapura, con fines de consumo humano, al igual que uso doméstico, agrícola o industrial ya que su tecnología es

capaz de remover impurezas más que cualquier otra. Las plantas de tratamiento de agua en la Republica Dominicana por ejemplo son en su mayoría a través de la osmosis inversa.

## 2.2- Marco teórico

### 2.2.1- Clasificación de los procesos de desalinización

En la figura 2 y 3 se muestran las distintas clasificaciones de los sistemas de desalinización de agua. Nuestro proceso de desalinización se encuentra siendo parte de los procesos impulsados térmicamente, a través del calentamiento de agua, utilizando la evaporación. En la imagen y, se observan los distintos tipos de energía renovable que se utiliza con cada uno de los procesos o sistemas de desalinización, en la cual se puede ver que el sistema MSF es utilizado con energía solar.

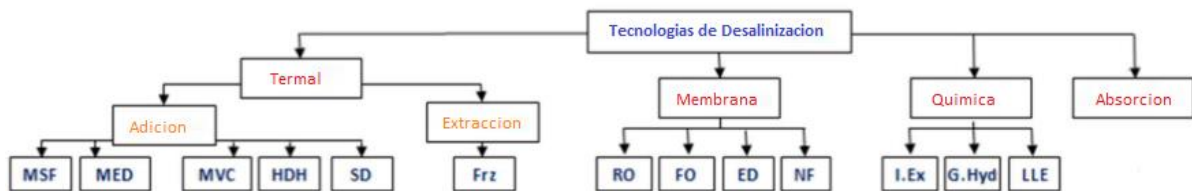


Figura 2. Clasificación de los sistemas de desalinización según su sistema (Theses et al., 2018).

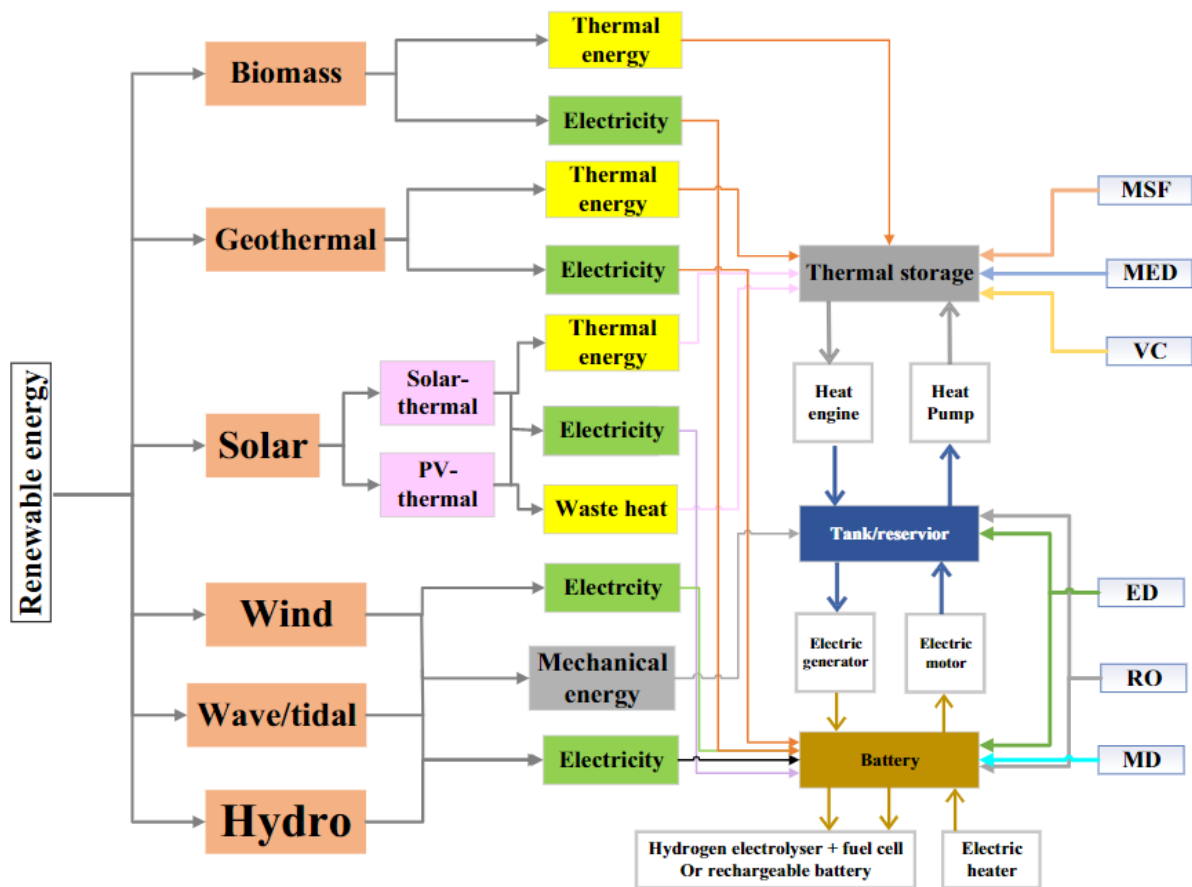


Figura 3. Aplicación de energías renovables según el tipo de sistema implementado (Al-Fulaij, 2011).

### 2.2.2- Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)

El sistema Multi-Stage Flashing (MSF) (ver figura 4), en español Evaporación Instantánea Multietapa, es un proceso donde la salmuera se procesa en diferentes etapas. En cada nueva etapa la presión es menor que en la precedente y a su vez menor que la presión atmosférica. De esta manera se obtiene una rápida evaporación del agua (flash) y al pasar a la siguiente etapa se extrae más agua. El agua salada se calienta sobre su temperatura de saturación en un calentador de salmuera a través de vapor de agua que rodea el sistema de tuberías que contiene el agua salada. En esta etapa es donde se requiere energía externa, la cual, en el caso de la figura 4, proviene de foto celdas solares.

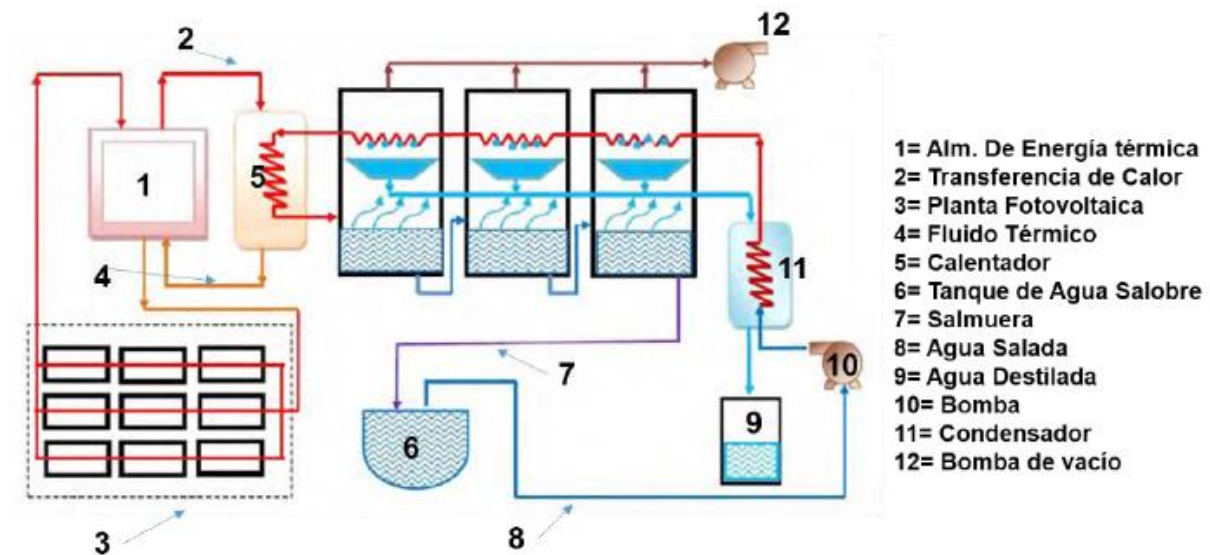


Figura 4. Ejemplo de funcionamiento de una planta desalinizadora con sistema MSF (Gómez, 2018).

El objetivo principal de una planta MSF, en comparación con una planta más simple de una sola etapa, es aumentar el valor de la relación de rendimiento del sistema aumentando la cantidad de etapas.

En una planta a gran escala el sistema funciona de la siguiente manera:

1. El agua de mar pasa por un proceso de desaireación y se trata químicamente antes de introducirse en los tubos de condensación a la última etapa del sistema.
2. El agua de mar se va precalentando a través de intercambio de calor en contracorriente con el vapor dentro de cada cámara.
3. La salmuera entra a un calentador donde se termina de llevar a la temperatura de saturación específica dada por el nivel de presión de la primera cámara.
4. La salmuera entra a la primera cámara, donde se crea vapor de agua a través del *flashing*.
5. La salmuera continúa entrando a las cámaras subsiguientes, cada una con una presión menor, causando el *flashing* una y otra vez extrayendo cada vez más vapor de agua.
6. El vapor asciende dentro de la cámara condensándose en los tubos de alimentación del agua de mar que va hacia el calentador.
7. El agua condensada se recolecta dentro de cada cámara en una tolva, y a través de una corriente de agua conectando la tolva de cada cámara afuera un tanque final de recepción del agua.

Algunas notas importantes a la hora del diseño de una planta MSF es que la última cámara se limita a que la salmuera esté a menos de 30-40 °C. Por razones termodinámicas, una reducción por debajo de estas temperaturas causaría un aumento drástico en las dimensiones de cada cámara, aumentando naturalmente el costo de operación y reduciendo eficiencia (Al-Fulaij, 2011).

Otro dato para considerar en la funcionalidad de estas plantas es el hecho de que, en algunas condiciones de operación, gases tales como el aire y gases disueltos como la descomposición del  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  que existen dentro del sistema pueden reducir el intercambio de calor de la operación, incrementando la tendencia a corrosión y disminuyendo la cantidad de *flashing*. Esto da lugar a la necesidad de tener ventilación adecuada para proteger la eficiencia del sistema (Al-Fulaij, 2011).

Ya que estas plantas trabajan con agua con alto contenido de sal, los materiales a utilizar a la hora de fabricar las mismas tienen que ser resistentes a la corrosión. Por lo general se utilizan aceros inoxidable por su gran resistencia a ser corroídos. De los tipos de aceros inoxidables, el 316 L es especialmente utilizado para ser trabajado en ambientes marítimos expuestos al océano ya que su contenido de molibdeno del 2-3% le da un aumento a la resistencia a la corrosión frente a sus diferentes variaciones. De este acero están construidas las mayorías de plantas MSF. Las paredes, techos y compartimientos de las etapas en las plantas MSF están hechas de acero carbono revestidas de acero inoxidable 316 L en las áreas expuestas a mayor corrosión en el sistema. Encima de todo esto, las cámaras están altamente aisladas para proteger la pérdida de calor hacia el exterior (Al-Fulaij, 2011).

### **2.2.3- Humificación y deshumidificación (HDH)**

Dentro de las tecnologías de base térmica de evaporación, también tenemos la HDH. Este proceso de desalinización imita el ciclo natural de lluvia. Sus componentes principales son un humidificador, un deshumidificador, y un calentador. En el humidificador se humidifica el aire poniéndolo en contacto directo con la salmuera, y en el deshumidificador se pone aire caliente en contacto con salmuera fría. Esto causa que el vapor se condense y cree una corriente de agua potable. Como el sistema MSF, este tiene una inyección de energía térmica en el calentador para su funcionamiento (Khraisheh et al., 2022).



#### **2.2.4- Desalinización de una etapa (SSD)**

Este tipo de sistema funciona de manera similar al MSF, con unas pequeñas diferencias. Al ser un sistema de una etapa la presión y temperatura son más bajas. Por lo general estos sistemas funcionan a presión de vacío ( $<0.1$  bar) y con una temperatura de salmuera menor a  $45^{\circ}\text{C}$ . Estos sistemas son menos costosos ya que necesitan menos energía por las temperaturas que manejan, especialmente en costo de instalación, pero sacrifican en gran parte la cantidad de generación de agua (Theses et al., 2018).

### **3- Metodología de trabajo**

Debido a que en República Dominicana no existen aplicaciones de plantas desalinizadoras de agua salada para comunidades de bajos recursos, y en la recopilación de información sobre esta aplicación, existen muy pocas referencias que incluyen un modelado matemático de una planta desalinizadora, se tiene una combinación de estudio exploratorio y experimental porque se busca realizar una intervención en una población, para mejorar su calidad de vida y, porque, la creación tanto del documento del proyecto como la construcción del prototipo y sus implicaciones de investigación, aportarían al desarrollo de estas aplicaciones de plantas desalinizadoras a pequeña escala, ya que son aplicaciones a gran escala para suplir a países con mayor densidad poblacional que la República Dominicana.

#### **3.1- Instrumentos y equipos**

Para la formulación de este anteproyecto se contempla el uso de las siguientes herramientas:

- SolidWorks: Software CAD de diseño 3D, en el cual se ensamblarán las distintas partes del sistema para su visualización antes de ser armado.
- CyclePad: Software de simulación de circuitos termodinámicos, en el cual se simuló el funcionamiento del circuito termodinámico de la planta desalinizadora para obtener valores necesarios en los cálculos.

### **3.2- Procedimiento**

1. En primer lugar, se recopiló información sobre los distintos sistemas de desalinización existentes; esta también fue provista por los profesores involucrados en el proyecto, con los cuales se tuvo una conversación de los requerimientos y necesidades del proyecto, para entender la problemática que abarca la creación de este prototipo.
2. Luego se realizó una lectura comprensiva de los textos académicos con el fin de definir el tipo de sistema a utilizar en el prototipo, de aquí se decidió utilizar el sistema MSF del que ya se ha hablado.
3. Después, se empezaron a plasmar las ideas en un documento, empezando por los objetivos generales y específicos del proyecto. En este caso, los objetivos del proyecto van acorde con las necesidades y requisitos del prototipo a construir, lo cual permitió una delimitación clara de este para realizar los demás conceptos como el alcance del proyecto.
4. Se realizó una reunión con los participantes del proyecto para definir los componentes a utilizar y el diseño del sistema del prototipo en base a los objetivos planteados. Con esta información, se realizó una simulación del funcionamiento del sistema en el software CyclePad para obtener datos necesarios para los cálculos.
5. Se realizaron dos visitas a Monte Cristi para evaluar la zona en donde se va a instalar el prototipo y se pudo indagar más sobre las condiciones de vida de sus habitantes, con el fin de realizar un diseño apto para sus necesidades.
6. Luego de la obtención de estos resultados, se calculó el área superficial mínima necesaria para producir el calor necesario para evaporar el agua de mar, el diámetro mínimo necesario para las tuberías, y la bomba a utilizar.
7. Por último, se realizó un diseño preliminar del sistema en SolidWorks, la selección de materiales y componentes específicos para realizar un presupuesto aproximado del costo del prototipo a construir.

### 3.3- Selección de componentes

Luego de comprender el funcionamiento básico de este sistema, explicado en la sección 2.2.2, y observar el diagrama de conexión de la misma sección, para el funcionamiento de este sistema se necesitan los siguientes componentes:

Tabla 1: Componentes del proyecto y su función

Componente	Función
Bomba	Succionar agua de mar a la torre de almacenamiento principal
Tinaco de recolección de agua de mar	Almacenar el agua de mar que será suplida al sistema
Tinaco de recolección de agua dulce	Almacenar el agua dulce que sale del sistema
Unidad de evaporación condensación	Corazón del sistema, basado en la evaporación/condensación multietapa
Calentador solar	Calentar el agua de mar a la temperatura necesaria
Paneles solares	Suplir energía principalmente a la bomba, y cualquier otro componente no primario que lo necesite.
Tuberías	Interconexión de componentes del sistema
Llave	Controlar el caudal del tinaco que suple al sistema.

### 3.4- Base de cálculo

Para este proyecto se ha decidido producir 1 m<sup>3</sup> de agua diario, el cual se producirá de 11 A.M. a 4 P.M., debido a que en estas 5 horas de sol se presenta una mayor intensidad de radiación. Para el cálculo del flujo másico se utilizó un volumen de 2.5 m<sup>3</sup> de agua de mar porque 1 m<sup>3</sup> de agua dulce es el 40%, que es el porcentaje estimado de evaporación de agua para el sistema.

Para la primera parte de los cálculos, se utilizará el software CyclePad mediante el cual se modelan circuitos termodinámicos, con el fin de obtener la cantidad de calor que el sistema debe producir para evaporar el agua de mar.

Para obtener el flujo másico:

$$5 \text{ horas de sol} \rightarrow 18000 \text{ segundos}$$

$$\rho_{\text{mar}} = 1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{MetAs \& Metrólogos Asociados, 2010})$$

$$\rho_{\text{mar}} = \frac{m_{\text{agua}}}{V} \rightarrow m_{\text{agua}} = \rho_{\text{mar}} \cdot V$$

$$m_{\text{agua}} = \left(1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (2.5 \text{ m}^3)$$

$$m_{\text{agua}} = 2567.5 \text{ kg}$$

$$\dot{m} = \frac{m_{\text{agua}}}{t} = \frac{2567.5 \text{ kg}}{18000 \text{ s}}$$

$$\dot{m} = 0.1426 \text{ kg/s}$$

Para calcular la presión con la que bajará el agua del primer tinaco utilizamos la fórmula:

$$P = \rho g h$$

En donde:

$$\rho_{\text{mar}} = 1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

Sustituyendo:

$$P = \left(1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (2 \text{ m}) P = 20149.74 \text{ Pa} P \approx 20.15 \text{ kPa}$$

Para el circuito de la figura 5 se tienen los siguientes componentes:

- SOURCE1: simula la entrada de agua de mar al sistema, como indica su nombre es la fuente de entrada del sistema.
- HX1: sus siglas significan “heat exchanger”, este es el intercambiador de calor, mediante el cual se va a condensar el vapor de agua para la obtención de agua dulce.
- HTR1: el “heater” en este caso es el calentador solar que se utilizará en el sistema
- SPL1: el “splitter” simula el divisor del agua y del vapor. Por un lado, al fondo del tanque, se tiene la salmuera con un mayor grado de salinidad con el que entró, y por el otro lado, la salida de agua dulce luego de que el vapor de agua se condensa.
- Salmuera: este “sink” simula la salida de agua con mayor grado de salinidad.
- Agua dulce: este segundo “sink” simula la salida de agua dulce que se recolectará.

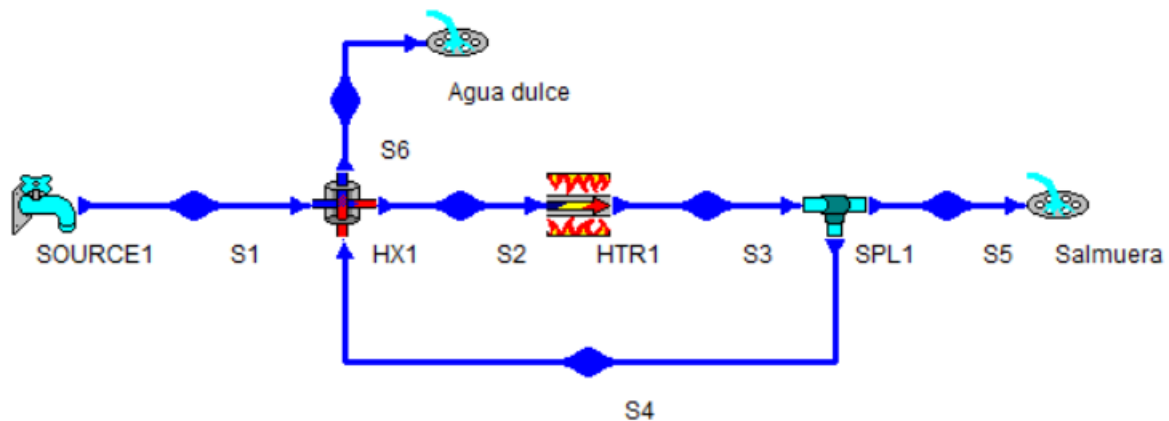


Figura 5. Simulación del sistema en CyclePad.

Luego de haber obtenido los valores iniciales del primer estado termodinámico y armar el circuito termodinámico en CyclePad, se realiza la modelación de los componentes, como se observa en la figura 6:

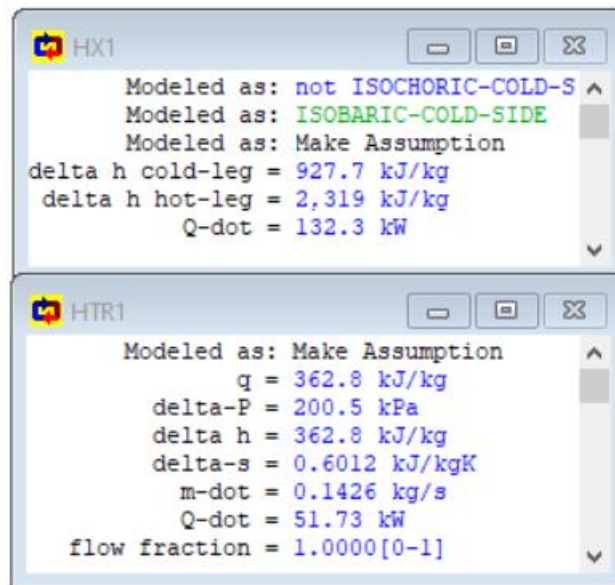


Figura 6. Modelado de componentes en CyclePad.

Para el intercambiador de calor (HX1), se modela el lado frío como isobárico, es decir, que funcionará a presión constante. Esta parte del prototipo será la tubería en forma de V escalonada, que funcionará como el condensador de vapor y el agua estará fluyendo a presión constante, desde el tinaco de recolección de agua de mar. En cuanto al calentador solar (HTR1) no se colocó una asunción de funcionamiento isobárico porque este componente funciona en un rango de presión especificado por el fabricante.

Luego de modelar los componentes, el siguiente paso es introducir los datos numéricos que nos pide el software. Estos datos introducidos se ven de color verde y los azules son dados por el software, ya que este va solucionando los estados termodinámicos a medida que se introducen estos valores.

Introducción de datos en cada estado:

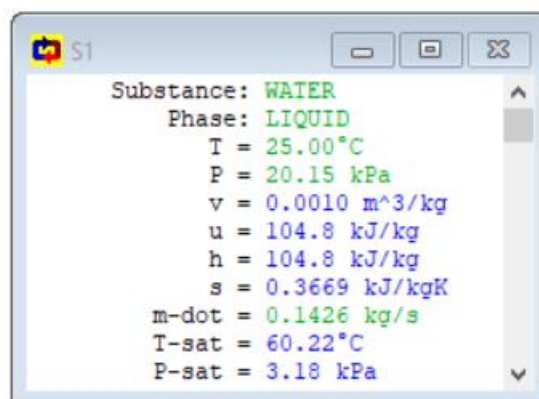


Figura 7. Estado S1.

En el estado S1 se introdujo el fluido con el que vamos a trabajar (agua) y su fase inicial (líquida), se colocó una temperatura de 30 °C, que es una temperatura estimada a la que se encontrará el agua de mar, y la presión calculada anteriormente de 20.15 kPa. Por último, se introdujo el flujo másico obtenido anteriormente en los cálculos iniciales. En este primer estado, el agua se encuentra en el primer tinaco de recolección de agua de mar, la cual va a bajar por gravedad a las tuberías.

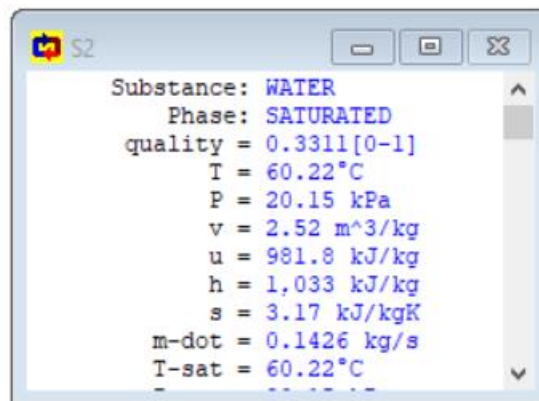


Figura 8. Estado S2.

El segundo estado termodinámico (S2) fue completamente resuelto por el software, no fue necesario introducir ningún valor. En este segundo estado, el agua se encuentra transitando las tuberías entre el intercambiador de calor y el calentador solar.

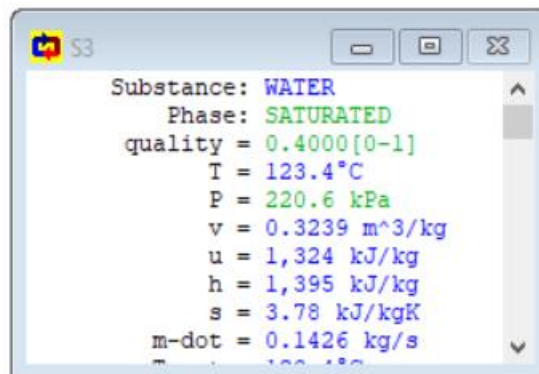


Figura 9. Estado S3.

En el estado S3, se colocó una fase saturada del agua con calidad 0.4, lo cual significa que se evapora un 40% del agua de sal que se encuentra dentro de la cámara de evaporación. Para el valor de la presión, se tomó como referencia un calentador solar comercial que funciona en un rango de presión de 30 – 35 psi. Se seleccionó 32 psi como valor intermedio y se convirtió a



kPa para introducirlo en el software. En este estado, el agua de mar se encuentra a una temperatura bastante alta y va a entrar a la cámara de evaporación.

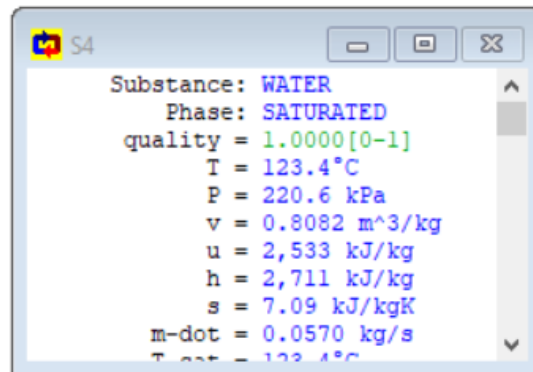


Figura 10. Estado S4.

En S4 solo se colocó la calidad del agua; este valor se debe a que dentro de la cámara de evaporación se mantendrá una cama de agua que no se evaporará, sino que tendrá una velocidad lenta para permitir la evaporación de la superficie. Este estado representa el agua evaporada, y en el resultado de flujo másico se puede observar que se evapora el 40% de la salmuera debido a que el 40% de 0.1426 kg/s es 0.0570 kg/s.

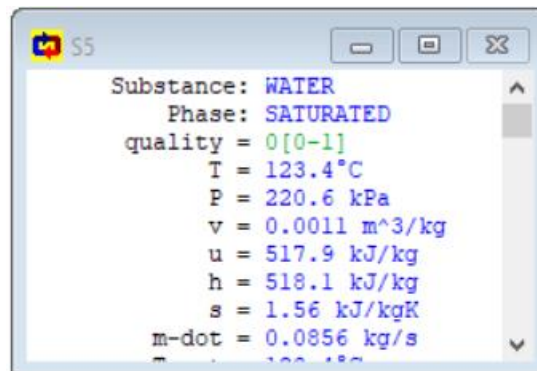


Figura 11. Estado S5.

En S5 se colocó una calidad 0 debido a que en esta parte del sistema se expulsa el agua con alto contenido de sal y no se encuentra en estado de mezcla, por ende, es de calidad 0. En esta parte del recorrido del agua en el sistema termina y es expulsada.

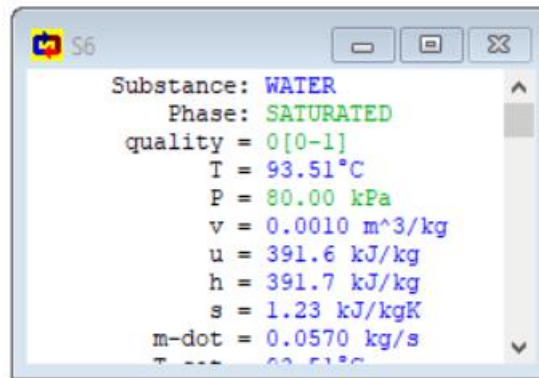


Figura 12. Estado S6.

Para el último estado, S6, se colocó una fase saturada de calidad 0, por la misma razón que el estado S5. En esta parte, se recolecta el agua dulce, la cual no se encuentra en un estado de mezcla. El alto valor de la temperatura se debe al alto valor de la presión, el cual es editable.

Resultados obtenidos:

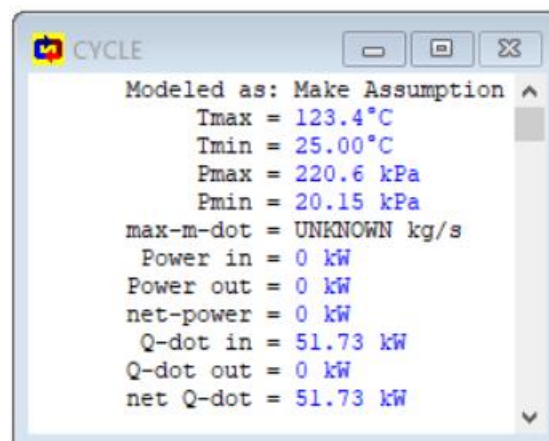


Figura 13. Resultados del ciclo termodinámico.

Como resultado de la simulación del circuito termodinámico de la planta desalinizadora, se obtiene un valor de calor  $Q = 51.73 \text{ kW}$ .

Luego de obtener la cantidad de calor necesaria para evaporar esta cantidad de agua, se necesita calcular el área superficial mínima necesaria para producir esta cantidad de calor en la cámara de evaporación.

Para esto se tiene la siguiente formula:

$$Q = -hA(T_s - T_f)$$

En donde:

$$Q = \text{Calor} \quad h = \text{Coeficiente de convección} \quad A = \text{Área superficial} \quad T_s = \text{Temperatura de la superficie} \quad T_f = \text{Temperatura del fluido}$$

Datos:

$$Q = 51.73 \text{ kW} = 51,730 \text{ Wh} = 4000 \frac{W}{m^2 K} T_s = 60^\circ \text{C} = 333.15 \text{ K} \quad T_f = 65^\circ \text{C} = 338.15 \text{ K}$$

Para el coeficiente de convección se tomó un valor intermedio de  $4000 \frac{W}{m^2 K}$  en base al Anexo 1, en donde se especifica que el coeficiente de convección forzada del agua y líquidos tiene un rango de 50 a  $10,000 \frac{W}{m^2 K}$ .

Despejando la fórmula anterior:

$$A = -\frac{Q}{h(T_s - T_f)} \quad A = -\frac{51,730 \text{ W}}{4000 \frac{W}{m^2 K} (333.15 \text{ K} - 338.15 \text{ K})} \quad A = 2.5865 \text{ m}^2 \quad A \approx 2.6 \text{ m}^2$$

Si se asigna un valor arbitrario a la base o altura del área superficial:

$$b = 1.5 \text{ m}$$

Sabiendo que:

$$\text{Área} = \text{base} \times \text{altura} \quad \text{altura (h)} = \frac{\text{Área (A)}}{\text{base (b)}} \quad h = \frac{2.6 \text{ m}^2}{1.5 \text{ m}} \quad h = 1.73 \text{ m} \quad h \approx 1.7 \text{ m}$$

Obtenemos unas dimensiones de área superficial de  $1.5 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$ , para producir un calor de  $25,990 \text{ W}$ . Se asigna una profundidad de  $2.5 \text{ m}$ , y de esta manera se obtienen las dimensiones mínimas para la cámara de evaporación del sistema.

*Cálculos para el diámetro de la tubería:*

Tomando en cuenta que se necesita un primer tinaco con capacidad de  $2,500 \text{ L}$ , se buscó un catálogo de tinacos para obtener el valor de altura de este. Los datos que se tienen son los siguientes:

$$\dot{m} = 0.1426 \frac{kg}{s}$$

$$\rho_{mar} = 1027 \frac{kg}{m^3}$$

Calculando el caudal que va a fluir en la tubería:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{mar}$$

Despejando Q:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_{mar}}$$

Sustituyendo valores:

$$Q = \frac{0.1426 \frac{kg}{s}}{1027 \frac{kg}{m^3}} Q = 1.3885 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Aplicando el Teorema de Torricelli, que nos dice que la velocidad de un líquido en una vasija abierta, por un orificio, es la que tendría un cuerpo cualquiera, cayendo libremente en el vacío desde el nivel del líquido hasta el centro de gravedad del orificio (Meléndez, 2016), se tiene la siguiente ecuación para el cálculo de la velocidad:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Utilizando la altura del tinaco con capacidad de 2,500 L, encontrado en un catálogo, tenemos 1.76 metros de altura total. Aproximando la altura del líquido a la parte superior de este, sin llenarlo completamente, se tiene una altura de 1.20 metros. Sustituyendo los valores de gravedad y altura en la ecuación de velocidad:

$$v = \sqrt{2 \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right) (1.20 m)} v = 4.85 \frac{m}{s}$$

Con la ecuación de caudal  $Q = \text{Área} \times \text{velocidad}$ , se despeja el área y se obtiene el área transversal de la tubería que se necesita:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{1.3885 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{4.85 \frac{m}{s}} A = 2.863 \times 10^{-5} m^2$$

Utilizando la fórmula de área de un círculo  $A = \pi r^2$ , se obtiene el radio de la tubería:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.863 \times 10^{-5} m^2}{\pi}} r = 3.02 \times 10^{-3} m$$

Calculando el diámetro:

$$D = 2rD = 2(3.02 \times 10^{-3} \text{ m})D = 6.04 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Convirtiendo este valor a pulgadas, debido a que es la unidad de medida mayormente utilizada en tuberías, se obtiene el siguiente valor a través del análisis dimensional:

$$D = (6.04 \times 10^{-3} \text{ m}) \left( \frac{39.3701 \text{ in}}{1 \text{ m}} \right) D = 0.2377 \text{ in}$$

Este resultado quiere decir que se necesita una tubería con un diámetro mínimo de 0.2377 pulgadas.

*Cálculos para la bomba:*

Para la bomba, empezamos con la ecuación de Bernoulli, que expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido (Meléndez, 2016). Se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_L + h_A = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

En donde:

$$P = \text{Presión} \quad \gamma = \text{Peso específico} \quad z = \text{Altura} \quad h_L = h_A = \text{Altura dinámica de la bomba} \\ = \text{gravedad} \quad v = \text{velocidad}$$

La parte izquierda de la ecuación representa el agua de mar, la cual tiene presión 0 por encontrarse a condiciones atmosféricas y velocidad 0, y como se toma su superficie como punto de referencia para la altura, también es 0, por lo que son variables que se cancelan. Del lado derecho se representa el agua de mar recolectada en el tinaco, la cual tendrá las mismas condiciones de presión y velocidad 0, por lo que, también, se cancela. Como resultado se tiene la siguiente ecuación:

$$h_A = z_2 + h_L$$

En esta ecuación,  $z_2$  representa la altura desde la superficie del agua hasta el punto más alto del tinaco.

Tanto en el área de succión como en el área de descarga del sistema se tienen pérdidas por accesorios y longitud de un total de  $h_L = 1.90 \text{ m}$ .

Se tomó un valor de 5 metros para  $z_2$ , el cual es un valor mayor a la altura estimada, por factor de seguridad y poder tener un rejuego con la altura del tinaco y posicionamiento de la tubería. Entonces:

$$h_A = 5 \text{ m} + 1.9 \text{ m} h_A = 6.9 \text{ m}$$

Calculando la potencia hidráulica de la bomba:

$$P_H = Q \cdot h_A \cdot \gamma_{\text{agua mar}}$$

Para el caudal se tiene un volumen de 2,500 L y se colocó un tiempo de 40 minutos para llenarlo:

$$40 \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 2400 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{2500 \text{ L}}{2400 \text{ s}} = 1.042 \frac{\text{L}}{\text{s}} Q = \left( \frac{1.042 \text{ L}}{\text{s}} \right) \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) Q = 0.00104 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Peso específico del agua de mar:

$$\gamma = s_g \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \gamma = (1.03) \left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \gamma = 10,104.3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Sustituyendo en la ecuación de potencia de la bomba:

$$P_H = \left( 0.00104 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) (6.9 \text{ m}) \left( 10,104.3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) P_H = 72.508 \text{ Watts}$$

Dividiendo entre la eficiencia de la bomba (se toma un valor de 70% asumiendo el peor escenario):

$$P_H = \frac{72.508 \text{ W}}{0.7} P_H = 103.58 \text{ W}$$

Convirtiendo el valor a caballos de fuerza:

$$P_B = \frac{103.58 \text{ W}}{745.6} P_B = 0.1389 \text{ HP}$$

Se necesita una bomba de ½ HP, ya que este es el valor comercial más pequeño que se puede conseguir. Además, para la succión se utilizará un diámetro de tubería de 1 ½ pulgada y para le descarga y el resto del sistema, un diámetro de 1 pulgada.

### 3.5- Selección de materiales

Los componentes que requieren una selección de materiales son las tuberías, cámara de evaporación y tolva. Para la cámara de evaporación se seleccionó el acero inoxidable 316, esta decisión se tomó en base a la revisión de literatura para el marco teórico, en donde se encontró que es el material utilizado en las plantas de desalinización MSF y también fue consultado y aprobado por profesores que forman parte del proyecto.

En cuanto a las tuberías se seleccionó PVC para las que van conectadas a la bomba y al tinaco de recolección de agua de mar, polietileno de alta densidad (HDPE) para la conexión de la tolva y el tinaco de depósito de agua dulce y acero inoxidable 316 para las demás tuberías, cámara de evaporación y tolva.

### 3.6- Diseño del prototipo: primera idea

En la figura 14 se muestra una vista previa del prototipo a realizar. Se tiene que el tinaco que se encuentra en la plataforma es en donde se va a recolectar el agua de mar, que va a bajar por la tubería en forma de V que está justo encima de la tolva, el agua seguirá su recorrido hacia el calentador solar, y de este saldrá a la cámara de evaporación, en donde se evaporará el agua, dejando una cama de salmuera alta en sales, y el condensado se recolectará en el tinaco que se encuentra en el piso. Es importante aclarar que en este prototipo se está modelando el funcionamiento de una planta desalinizadora MSF, la cual cuenta con múltiples etapas en aplicaciones comunes, con la diferencia de que este será de una sola etapa. Se realiza esta salvedad para diferenciarla del sistema SSD explicado en la sección 2.2.4.

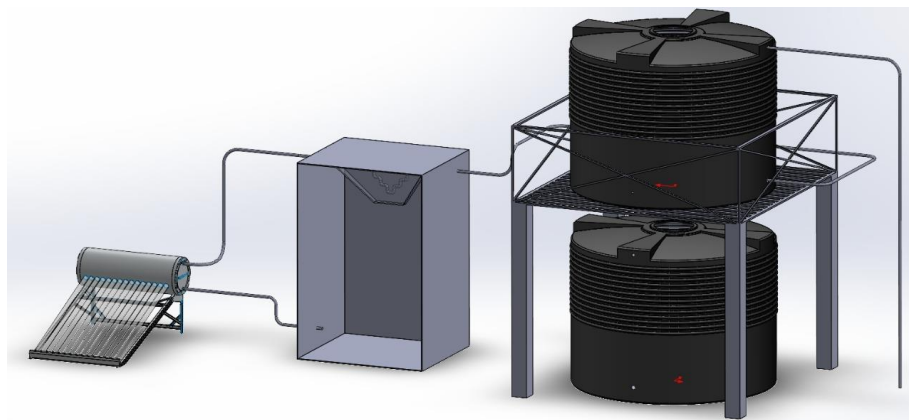


Figura 14. Diseño del prototipo.

#### 4- Planos generales para la construcción del desalinizador solar.

Las figuras 15 y 16 muestran la vista en planta del desalinizador solar y un corte de la cámara de evaporación y condensación. Junto a este informe se entregan los planos de detalle para la construcción del equipo.

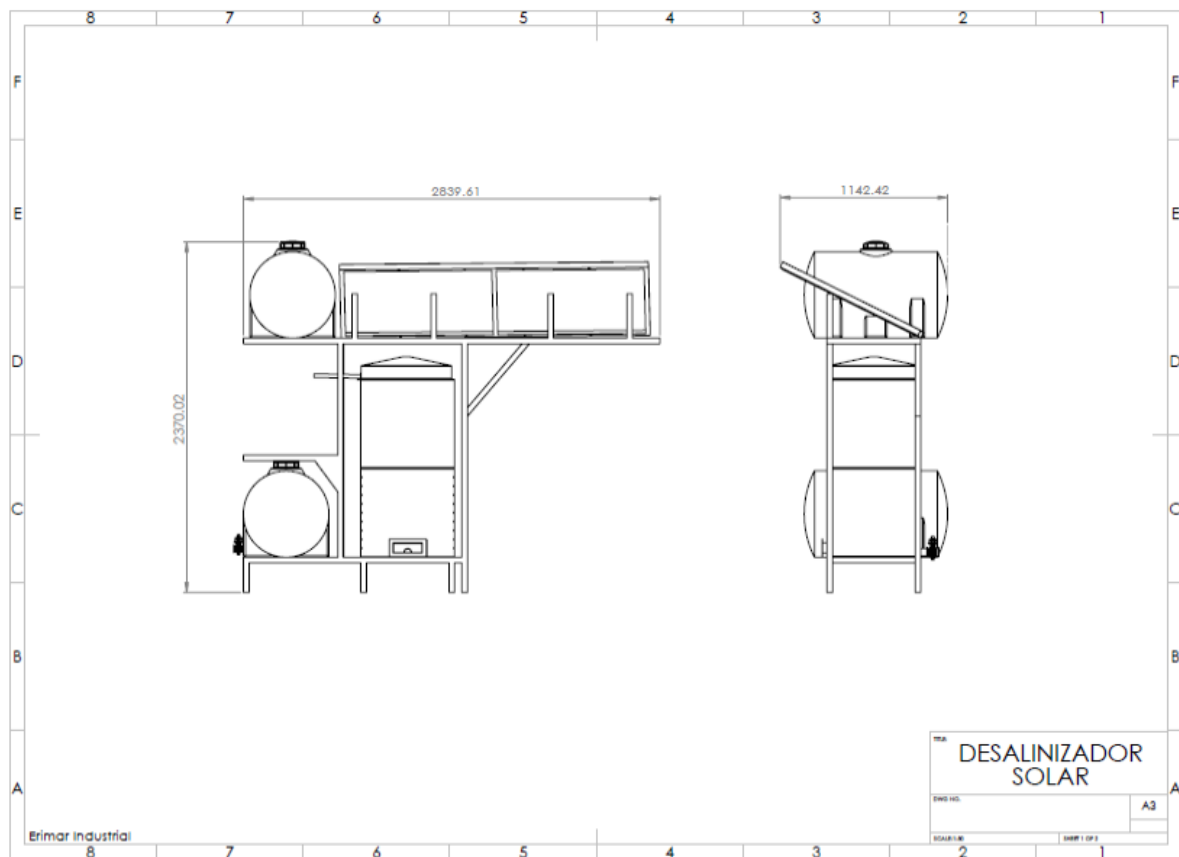


Figura 15. Vista en planta del prototipo.



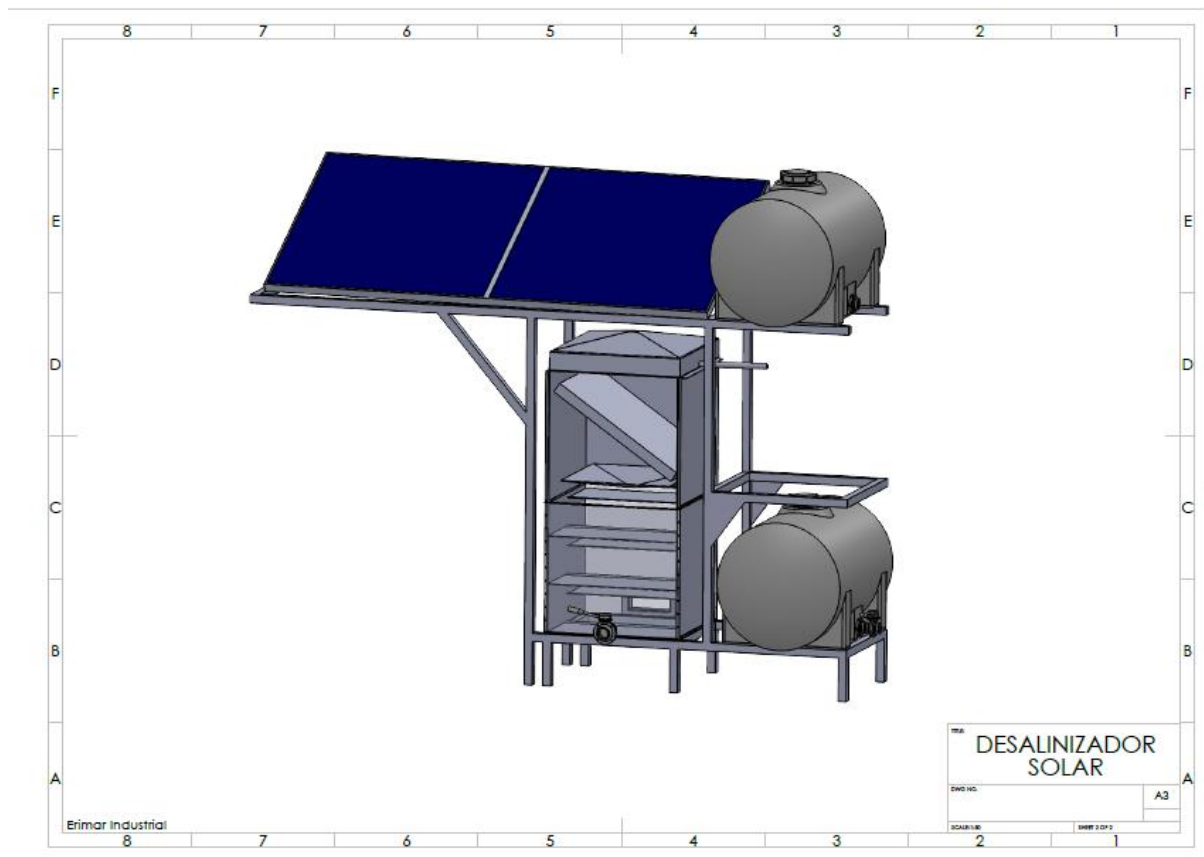


Figura 16. Corte en planta del prototipo.

## 5- Construcción y montaje del desalinizador termosolar de agua.

La figura 17 muestra una secuencia de fotos de la etapa de construcción y montaje del desalinizador de agua en la plataforma de experimentación del INTEC.



Figura 17. Construcción y montaje del desalinizador de agua en la plataforma de experimentación del INTEC.

## 6- Puesta en marcha del desalinizador solar en la plataforma experimental del INTEC.

El sistema de desalinización solar de agua se montó en la plataforma experimental de INTEC del 2 al 11 de marzo del 2023. La figura 18 muestra una vista frontal del equipo y los detalles de sus componentes.



Figura 18: Desalinizador solar en la plataforma experimental del INTEC. T1: Tanque de agua salada; T2: Tanque de agua destilada; DS: Desagüe de salmuera; CC: Cámara de condensación; CE: Cámara de evaporación; CS: Calentador solar; PS1: Paneles solares para la alimentación de la bomba de agua; PS2: Panel solar para la alimentación del soplador del T2.

Durante la prueba en la plataforma del INTEC no se montó la bomba de agua, aunque se verificó su funcionamiento con los paneles solares (PS1). Las pruebas se realizaron con agua de la red. El tanque de agua salada (T1), que cuenta con un flotante para controlar el llenado con 500 litros, se llenó con una manguera desde una válvula de agua de la red urbana. En modo convencional de funcionamiento, el agua del tanque T1 pasa al serpentín de precalentamiento de agua ubicado en la cámara de condensación (CC). El agua precalentada sale de CC y entra al calentador solar (CS) donde se calienta hasta la temperatura de trabajo. Del CS el agua pasa a las bandejas de la cámara de evaporación donde el vapor sube a la cámara de condensación y el agua salada desciende por los platos de la CE hasta que sale por el desagüe de salmuera



(DS). El vapor sube a la cámara de condensación donde al entrar en contacto con el serpentín de enfriamiento y con las paredes de la CC condensa y pasa al tanque de agua destilada (T2). Una vez que el sistema se instale en su destino final, la salmuera se acumulará en el reservoir de la salina.

Para el control de parámetros del piloto se instalaron 5 termopares analógicos en T1, a la salida del serpentín de la CC, en el CS, a la entrada de la CE y en la CC. La figura 19 muestra los 5 termopares.

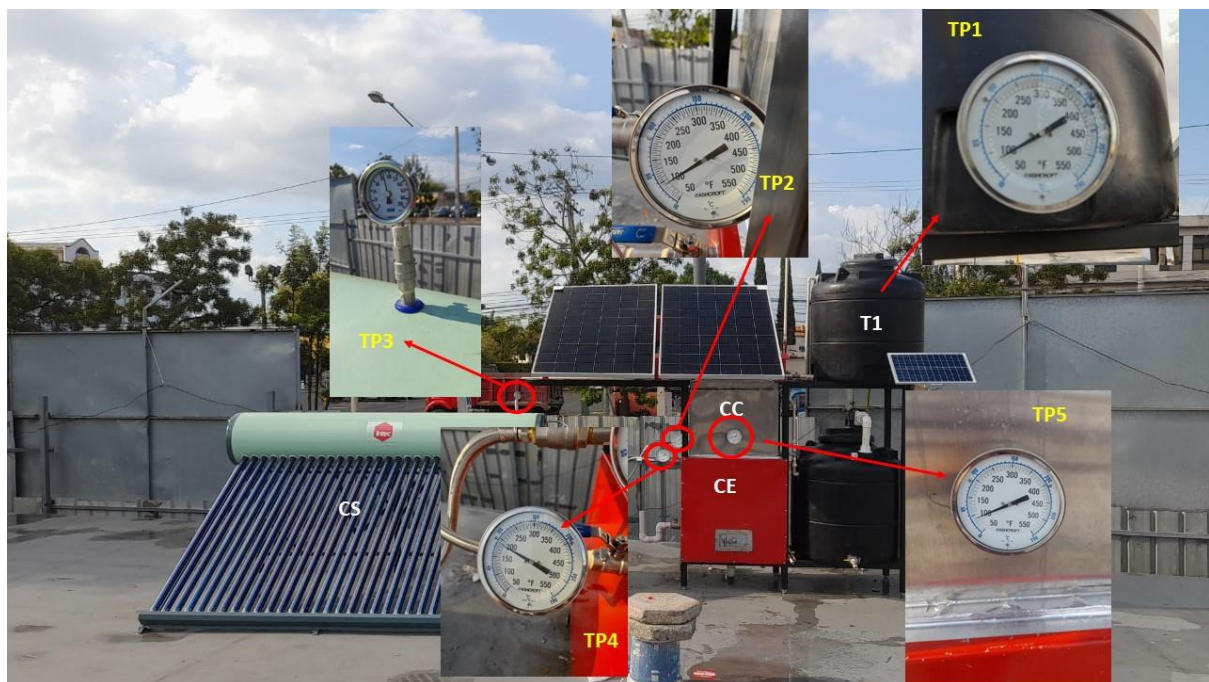


Figura 19: Termopares analógicos para la medición de la temperatura. TP1: termopar en el T1 (en la parte de atrás del tanque); TP2: termopar a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); TP3: termopar en el CS; TP4: termopar a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: termopar en la CC.

## 7- Evaluación del sistema de desalinización de agua en la plataforma experimental de INTEC.

El sistema de desalinización inició a funcionar el 22 de marzo del 2023, coincidiendo con el día mundial del agua. Las pruebas se realizaron los días 23, 24 y 27 de marzo. Las tablas 1-5 muestran los resultados de las pruebas por día. Para las pruebas el tanque de entrada se llenó de agua potable de la red de distribución. En cada tabla se muestra el valor de la calidad del agua al inicio y al final del proceso, medido con ayuda de un medidor multiparámetros, Hach el HQ40d, en el Laboratorio de Servicios Ambientales del INTEC.

La tabla 1 muestra las condiciones de operación y la eficiencia del proceso de destilación. Los ensayos se realizaron por un período de tiempo de 105 a 170 minutos, siempre en hora de la tarde, entre 2 y 5:30 pm (Tablas 2-4), lo que indica que se tiene una reserva importante en la operación del equipo para aprovechar el horario matutino. En todos los casos se operó a bajo flujo entre 1,471 y 2,019 L/min.

**Tabla 1:** Condiciones de operación y eficiencia en la recuperación de agua

Parámetro	23/3/2023	24/3/2023	27/3/2023	Promedio
Tiempo de operación, min	105	135	170	
Tiempo para iniciar la destilación, min	20	25	19	
Flujo de agua en DS, L/min	2,019	1,615	1,471	
Flujo de agua destilada, L/min	0,267	0,237	0,176	
Volumen de agua tratada, L	240	250	280	
Volumen de agua destilada, L	28	32	30	
Eficiencia de la destilación, %	11,67	12,80	10,71	11,73±1,04

Respecto a la eficiencia de destilación se considera baja (entre 10,71 y 12,80), inferior al valor estimado de diseño (entre 20-25 %). Se debe destacar que ninguno de los ensayos se realizó con el soplador funcionando, lo que garantizaría en el sistema una diferencia de presión que favorece que favorecerá el desplazamiento del vapor de agua de la cámara de evaporación a la cámara de condensación. Estas reservas en la operación se verificarán en el nuevo emplazamiento del prototipo, donde se trabajará con agua salada. Otro elemento a tener en cuenta es la mejora de la condensación, lo que deberá evaluarse para la nueva versión del prototipo, a través del aumento de la superficie de respuesta en el serpentín interno del condensador y en el aumento de la superficie de transferencia de calor en las paredes externas de la cámara de condensación.

Las tablas 2-4 muestran los perfiles de temperatura en cinco puntos del desalinizador. La temperatura del tanque de alimentación (T1) se mantuvo estable alrededor de los 30 grados todos los días y durante el período de ensayo. La temperatura a la salida del intercambiador de calor de la cámara de condensación osciló, principalmente, entre 40 y 48 °C, para una diferencia con la temperatura de entrada de 10-18 °C, funcionando como sistema de precalentamiento a la entrada del calentador solar. Durante el tercer día de operaciones en los primeros 20 minutos de operación se observó un comportamiento diferente de la temperatura, al oscilar entre 55 y 60 °C, lo que pudiera justificarse por un fuerte golpe térmico debido a la alta temperatura del agua y vapor a la entrada de cámara de condensación (96 °C)

**Tabla 2.** Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 23 de marzo del 2023.  
. T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
15:00	30	30	90	35	25
15:15	30	40	84	90	45
15:30	30	45	82	88	47
15:45	30	45	82	90	47
16:00	30	45	82	88	45
16:10	30	44	82	86	47
16:20	30	44	80	86	48
16:30	30	44	80	84	47
16:45	30	44	80	82	47

**Tabla 3.** Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 24 de marzo del 2023.  
. T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
14:00	30	30	86	34	30
14:15	30	48	84	86	50
14:30	30	46	84	86	46
14:45	30	46	84	84	46
15:00	30	44	82	84	46
15:20	30	44	82	82	46
15:40	30	44	82	82	44
15:55	30	42	80	82	44
16:15	30	42	80	80	42

**Tabla 4.** Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 27 de marzo del 2023.

T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
14:35	30	30	96	35	30
14:45	30	65	94	98	80
14:55	30	50	93	94	47
15:15	30	45	92	90	47
15:40	30	47	90	86	44
16:05	30	47	89	88	44
16:40	30	45	88	86	44
17:10	30	45	88	84	42
17:25	30	42	86	82	40

En cuanto a la temperatura en el calentador solar (T3), la misma estuvo en el rango y por encima del valor de diseño del fabricante (80-90 °C), disminuyendo durante la operación hasta un valor de 80 °C. Se espera que durante una operación por más tiempo este valor disminuya, pero deberá evaluarse en los estudios en el nuevo emplazamiento. Por tanto, la temperatura a la entrada de la cámara de evaporación (T4) se mantuvo todo el tiempo por encima de los 80 °C, valor que debe garantizar una buena evaporación de vapor de agua. Por último, la temperatura en la cámara de condensación (T5) osciló entre 40 y 50 °C, lo que indica un cambio importante de temperatura respecto a la temperatura de vapor de agua que debe estar cerca de la temperatura en la cámara de evaporación (80-90 °C).

El último elemento a evaluar es la calidad del agua. La tabla 5 muestra los valores de conductividad y salinidad del agua de entrada y salida durante los experimentos.

**Tabla 5.** Calidad de agua antes y después de la desalinización.

Parámetro	23/3/2023	24/3/2023	27/3/2023	Promedio
Conductividad entrada, $\mu\text{S}/\text{cm}$	536	514	604	551,33 $\pm$ 46,92
Conductividad salida, $\mu\text{S}/\text{cm}$	102	46,8	42,3	63,7 $\pm$ 33,24
Salinidad entrada, %	0,26	0,25	0,29	0,27 $\pm$ 0,02
Salinidad salida, %	0,02	0,02	0,02	0,02 $\pm$ 0,00
% de desalinización	92,31	92	93,1	92,47 $\pm$ 0,57

Los dos indicadores fundamentales de calidad del agua desalinizada muestran que el sistema logra una adecuada desalinización, en este caso expresado por la disminución del contenido salino del agua potable utilizada. En el primer día de experimentos la conductividad del agua destilada fue superior casi dos veces a la de los otros días, lo que pudiera explicarse por el arrastre de sales o impurezas depositadas en el equipo, que se empleaba por primera vez. El porcentaje de desalinización alcanza un valor muy favorable de más de 92 %.



## 8- Puesta en marcha del desalinizador solar en el Acuario Nacional de la República Dominicana.

El sistema de desalinización solar de agua se montó en el Acuario Nacional del 18 al 18 de junio del 2023. La figura 20 muestra una secuencia del montaje del equipo en el acuario.



Figura 20. Montaje del desalinizador de agua en el Acuario Nacional.

## 9- Evaluación del sistema de desalinización de agua en la plataforma experimental de INTEC.

En el Acuario Nacional se realizaron dos pruebas con agua salada los días se realizaron los días 21 de junio y 11 de julio del 2023. Las tablas 7-9 muestran los resultados de las pruebas por día. Para las pruebas el tanque de entrada se llenó de agua salada proveniente de la costa de Santo Domingo.

La tabla 7 muestra las condiciones de operación y la eficiencia del proceso de destilación. Los ensayos se realizaron por un período de tiempo de 105 a 170 minutos, en horario entre 11 am y 2 pm (Tablas 8 y 9). En todos los casos se operó a bajo flujo entre 1,528 y 1,826 L/min, valores en el rango de los estudiados en la plataforma experimental de INTEC.

Tabla 7: Condiciones de operación y eficiencia en la recuperación de agua en experimentos con agua salada.

Parámetro	21/6/2023	11/7/2023	Promedio
Tiempo de operación, min	90	95	
Tiempo para iniciar la destilación, min	26	28	
Flujo de agua en DS, L/min	1,826	1,528	
Flujo de agua destilada, L/min	0,224	0,215	
Volumen de agua tratada, L	164	145	
Volumen de agua destilada, L	20	21	
Eficiencia de la destilación, %	12,3	14,1	13,2±1,3

Respecto a la eficiencia de destilación fue inferior al valor estimado de diseño (entre 20-25 %). Como se planteó anteriormente, para la nueva versión del equipo deberá mejorarse la capacidad de condensación, a través del aumento de la superficie de respuesta en el serpentín interno del condensador y en el aumento de la superficie de transferencia de calor en las paredes externas de la cámara de condensación, pero velando por la caída de presión en el sistema de intercambio en la cámara de condensación.

Las tablas 8 y 9 muestran los perfiles de temperatura en cinco puntos del desalinizador. La temperatura del tanque de alimentación (T1) se mantuvo estable alrededor de los 30 grados durante el período de ensayo.

Tabla 8. Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 21 de junio del 2023.  
T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
11:00	30	30	84	36	30
11:15	30	36	82	82	41
11:30	30	44	82	82	45
11:45	30	44	81	82	45
12:00	30	43	80	80	45
12:15	30	43	80	80	45
12:30	31	43	80	79	45

Tabla 9. Evaluación del desalinizador de agua. Perfiles de temperatura. 11 de julio del 2023.  
T1: temperatura en tanque de entrada; T2: temperatura a la salida del serpentín de la CC (entre CC y CS); T3: temperatura en el CS; T4: temperatura a la entrada de la CE (entre CS y CE); T5: temperatura en la CC.

Hora	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	T5, °C
11:15	30	32	85	32	31
11:30	30	40	83	84	42
11:45	30	45	83	83	44
12:05	30	45	83	82	44
12:20	30	45	83	83	45
12:35	30	46	83	82	45
12:50	30	46	83	83	45

En cuanto a la temperatura en el calentador solar (T3), la misma estuvo en el rango y por encima del valor de diseño del fabricante (80-85 °C), disminuyendo durante la operación hasta un valor de 80 °C. La temperatura a la entrada de la cámara de evaporación (T4) se mantuvo todo el tiempo por encima de los 79 °C, valor que debe garantizar una buena evaporación de vapor de agua. Por último, la temperatura en la cámara de condensación (T5) osciló entre 41 y 45 °C, lo que indica un cambio importante de temperatura respecto a la temperatura de vapor de agua.

En cuanto a la calidad del agua se realizó un análisis más detallado que en las pruebas que se realizaron en la plataforma experimental del INTEC. Los análisis de los parámetros físico-químicos, del contenido de metales y de microbiología se realizaron en el laboratorio de servicios analíticos y ambientales de INTEC. Las tablas 10-13 muestran los valores promedios

de los parámetros evaluados en los dos experimentos realizados a la entrada y salida del desalinizador.

La tabla 10 muestra los valores de algunos parámetros físico-químicos del agua salada y después de tratar en el desalinizador. Los dos indicadores fundamentales de calidad del agua desalinizada (salinidad y conductividad) muestran que el sistema logra una adecuada desalinización, en este caso expresado por la disminución del contenido salino del agua salada. Igualmente, se observa una variación importante en los valores de los sólidos disueltos totales y la turbidez, mientras que el pH se mantuvo prácticamente constante. El porcentaje de desalinización alcanza un valor muy favorable de más del 99 %, superior al obtenido en los estudios realizados con agua potable en la plataforma de INTEC (superior al 92 %).

Tabla 10. Calidad del agua salada y destilada después de la desalinización.

Parámetro	Entrada	Salida	% de remoción
Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$	$46950 \pm 636$	$8,5 \pm 11,2$	99,98
Salinidad, %	$30,6 \pm 0,4$	0	100
Sólidos disueltos totales, mg/L	$29250 \pm 71$	$4,5 \pm 0,9$	99,98
Turbidez, NTU	$0,12 \pm 0,13$	0	100
pH	$7,75 \pm 0,07$	$7,48 \pm 0,05$	-

La tabla 11 muestra la variación del contenido de iones en el agua salada y el agua destilada en el desalinizador. El amonio estuvo por debajo del límite de detección del método analítico en los dos casos. Respecto al cloruro, los altos valores en el agua salada no permitieron su determinación en la misma. Por último, los nitratos y nitritos disminuyeron de manera importante con valores de remoción entre 30 y 42 %.

Tabla 11. Contenido de iones en el agua salada y destilada después de la desalinización.

Iones	Entrada	Salida	% de remoción
Amonio, mg/L	<0,4	<0,4	-
Cloruro, mg/L	n.d.	$5,9 \pm 0,$	-
Nitrato, mg/L	$0,8 \pm 0,3$	$0,4 \pm 0,$	$41,7 \pm 11,8$
Nitrito, mg/L	0,005	$0,004 \pm 0,001$	$30 \pm 14,1$

La tabla 12 muestra la variación del contenido de metales en el agua salada y el agua destilada en el desalinizador. Los dos macroelementos medidos en el agua salada, calcio y magnesio, redujeron su contenido en el agua destilada en más de un 99 % respecto al valor inicial en el agua salada.

Tabla 12. Contenido de metales en el agua salada y destilada después de la desalinización.

Metales	Entrada	Salida	% de remoción
Ca, mg/L	508±127	1,97±0,83	99,6±0,3
Mg, mg/L	802±100	0,9±0,3	99,9±0,1
Cd, mg/L	0,04±0,01	0,02±0,02	53±66,4
Zn, mg/L	0,19±0,22	0,03	52,9±53,1
Co, mg/L	0,39±0,06	0,03±0,003	91,6±0,6
Cu, mg/L	0,03±0,01	<0,02	100
Cr, mg/L	0,1±0,003	0,05±0,01	56,4±11,7
Fe, mg/L	0,2±0,05	<0,02	100
Mn, mg/L	0,03±0,01	<0,02	100
Ni, mg/L	0,25±0,05	<0,02	100
Pb, mg/L	0,18±0,05	<0,02	100

El resto de los metales pesados estudiados disminuyeron su concentración en el agua estilada entre un 50 y 100 %, con valores inferiores al límite de detección para el cobre, hierro, manganeso, níquel y plomo. Todos estos resultados certifican el proceso de desalinización del agua salada.

Por último, para el experimento del 11 de julio se realizó la caracterización microbiológica del agua salada y del agua destilada en el desalinizador (tabla 13).

Tabla 13. Caracterización microbiológica del agua salada y destilada después de la desalinización.

	Entrada	Salida	% de remoción
Aerobios mesófilos, UFC/1 mL	120	1	99,2
Coliformes totales, UFC/100 mL	Presencia	Presencia	-
E. coli, UFC/100 mL	Ausencia	Ausencia	-
Pseudomonas, UFC/100 mL	Presencia	Presencia	-

El contenido de microorganismos aerobios mesófilos disminuyó en el agua destilada en más del 99 % respecto al agua salada. La E. coli no estuvo presente ni antes ni después del tratamiento del agua salada, mientras que los coliformes totales y las pseudomonas estuvieron presentes tanto en el agua salada como en la destilada. Estos estudios requieren de mayor profundización en evaluaciones ulteriores de la instalación.



## 10- Taller de cierre del proyecto.

Los resultados del proyecto se presentaron en un taller de cierre con autoridades, especialistas y técnicos de varios organismos y organizaciones gubernamentales, privadas y organizaciones no gubernamentales. La figura 21 muestra una secuencia de fotos de esta actividad.



Figura 21. Taller de cierre del proyecto

## **11- Conclusiones**

Se diseñó, instaló y se puso en marcha el prototipo de desalinizador termosolar de agua salada. El funcionamiento del desalinizador se evaluó con agua potable y agua salada. Los estudios mostraron perfiles adecuados de temperatura en el reactor, una eficiencia de destilación del agua entre 12 y 14 %, inferior al valor de diseño, pero se identificó una reserva importante en la mejora de diseño en la unidad de condensación del prototipo. La calidad del agua destilada cumple con los parámetros esperados, alcanzando más del 92 % de desalinización. En los estudios con agua salada se logró una excelente remoción de iones y metales pesados que osciló entre el 30 y el 100 %. Los estudios de microbiología se realizaron para sólo un experimento, por lo que no se pueden llegar a conclusiones definitivas en cuanto a la calidad microbiológica del agua destilada, lo que requerirá de más experimentos y del uso de técnicas de análisis cuantitativas.

## 12- Referencias bibliográficas

- Al-Fulaij, H. F. (2011). Dynamic modeling of multi stage flash (MSF) desalination plant. *UNiversity College London (UCL)*, July, 334.
- EngineersEdge. (2017). *Convective heat transfer Coefficients table chart*. 19–19, 19–26. [https://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/convective\\_heat\\_transfer\\_coefficients\\_\\_13378.htm](https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm)
- Gómez, O. (2018). *Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable*.
- Khraisheh, M., Inamdar, M., Almomani, F., & Adham, S. (2022). Humidification–Dehumidification (HDH) Desalination and Other Volume Reduction Techniques for Produced Water Treatment. *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010060>
- Li, Y., Chen, X., Xu, Y., Zhuo, Y., & Lu, G. (2021). Sustainable thermal-based desalination with low-cost energy resources and low-carbon footprints. *Desalination*, 520(September), 115371. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115371>
- Libotean, D. M. (2008). *Modeling the Reverse Osmosis Processes Performance Using Artificial Neural Networks*.
- Meléndez, M. (2016). *Introducción a la Mecánica de Fluidos* (F. Rosario (ed.)). Editora Búho.
- MetAs & Metrólogos Asociados. (2010). Densidad del Agua. *La Guía MetAs*, 06, 2. <https://www.experimentoscientificos.es/densidad/densidad-agua/>
- Theses, A. E., Proetto, B., & Proetto, B. (2018). *Single-Stage , Venturi-Driven Desalination System*. <https://doi.org/10.25777/tzck-4w96>



Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana

Pequeñas subvenciones a la innovación del FONDO DE ADAPTACIÓN



Acción, Innovación - Aprender y Compartir.



ADAPTATION FUND



IDDI

Appendix IV.- Prototype designs and technical information



# Planos y esquemas del prototipo

Desalinizador Termosolar

Elaborado por: INTEC

Supervisión: IDDI





## Prototipo de Desalinización Termo solar Ficha Técnica

**Prototipo escalable**

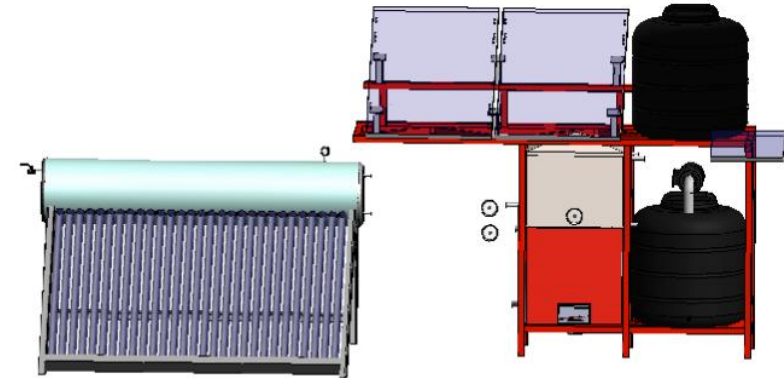
**Capacidad de agua potable: 250 L/día**

**Eficiencia de producción de agua potable del prototipo  
(Agua potable/agua salada): 11-15%**

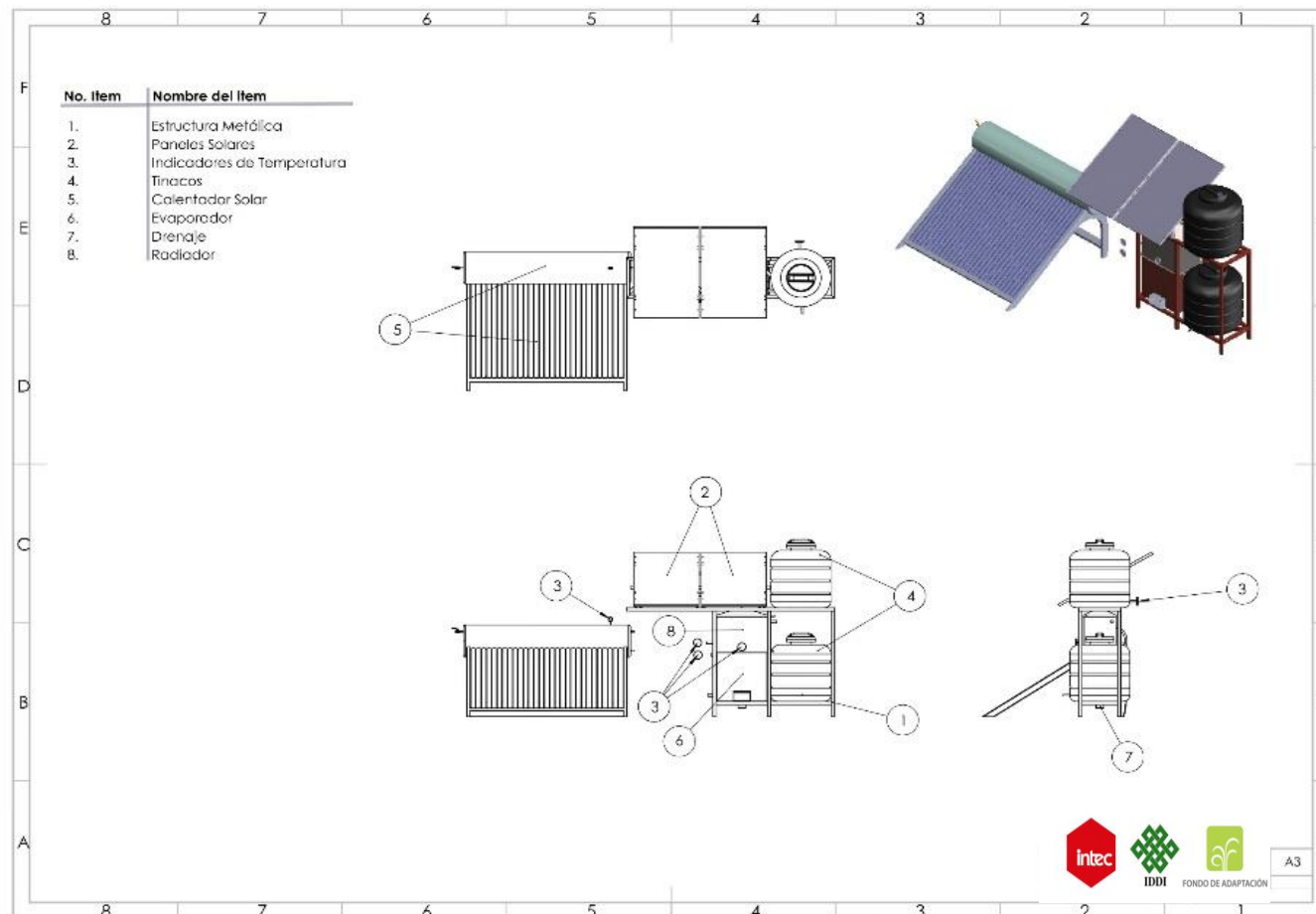
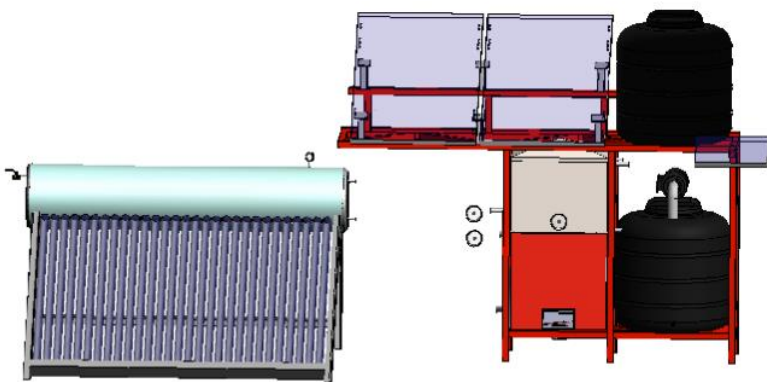
**Tiempo de trabajo diario: 7 horas**

**Energéticamente autónomo**

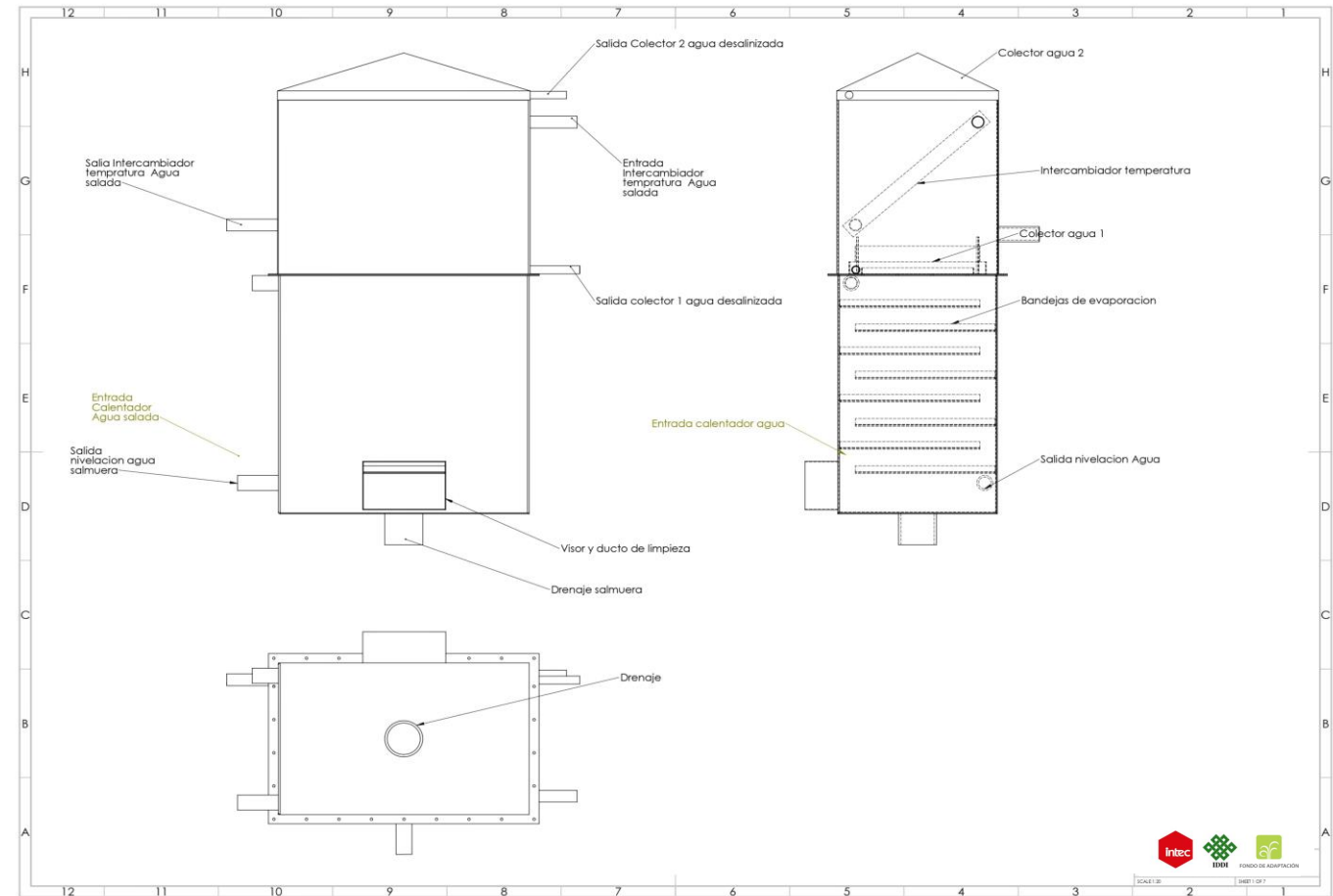
**Huella de carbono de operación: sin emisión CO<sub>2</sub> ni otros gases de efecto invernadero**



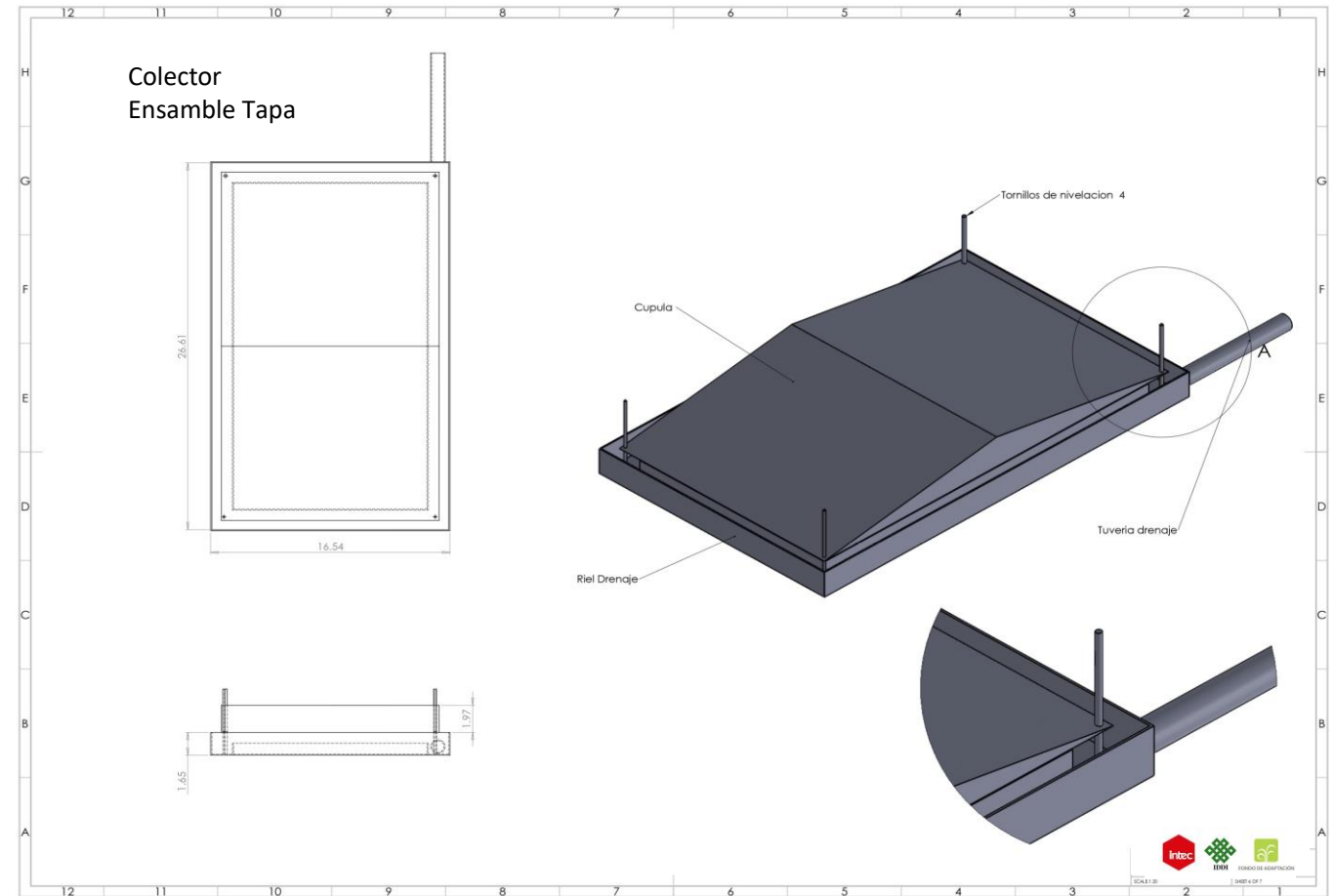
## Sistema Completo Prototipo de Desalinización Termo solar



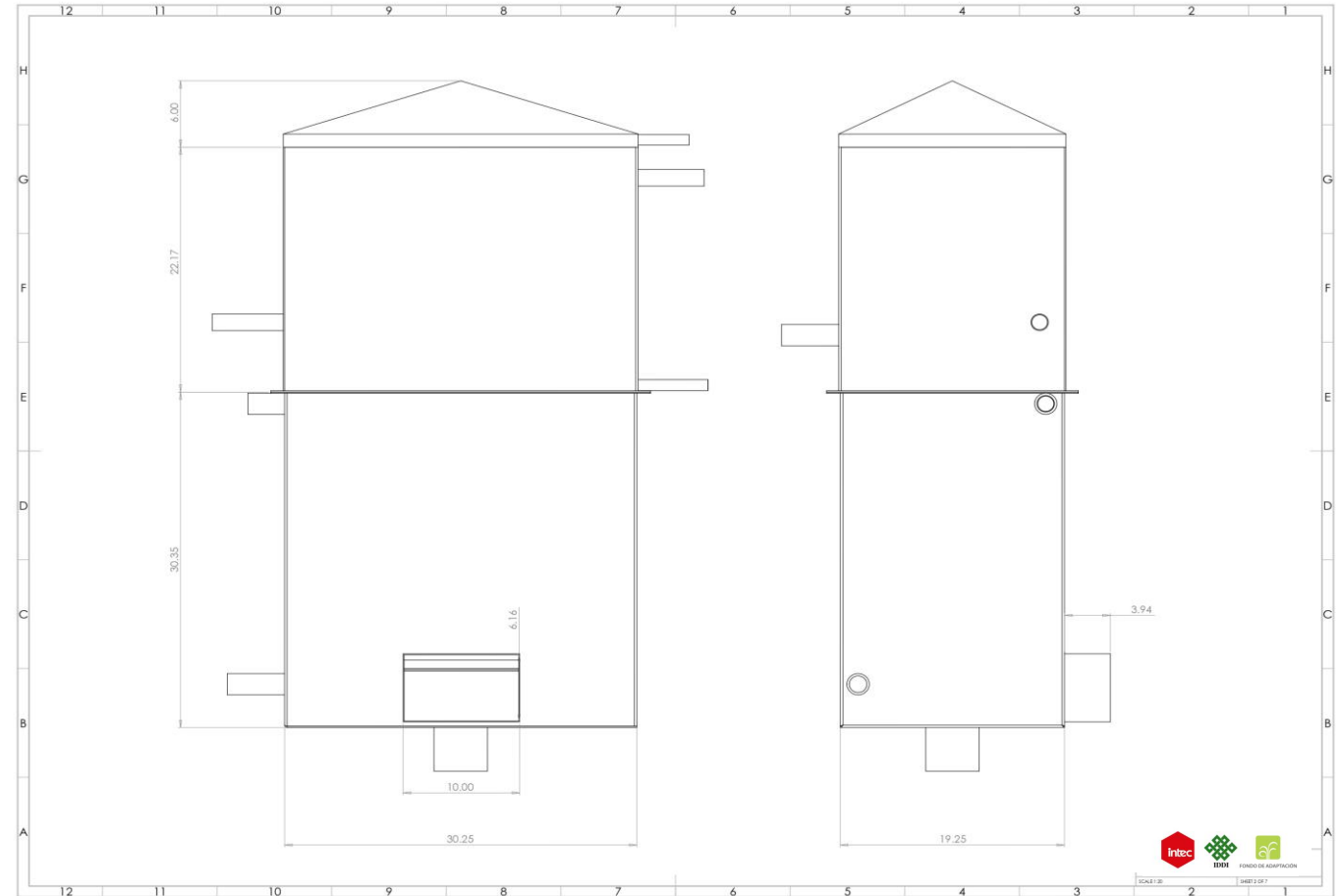
## Diseño General del Prototipo de Desalinización Termo solar



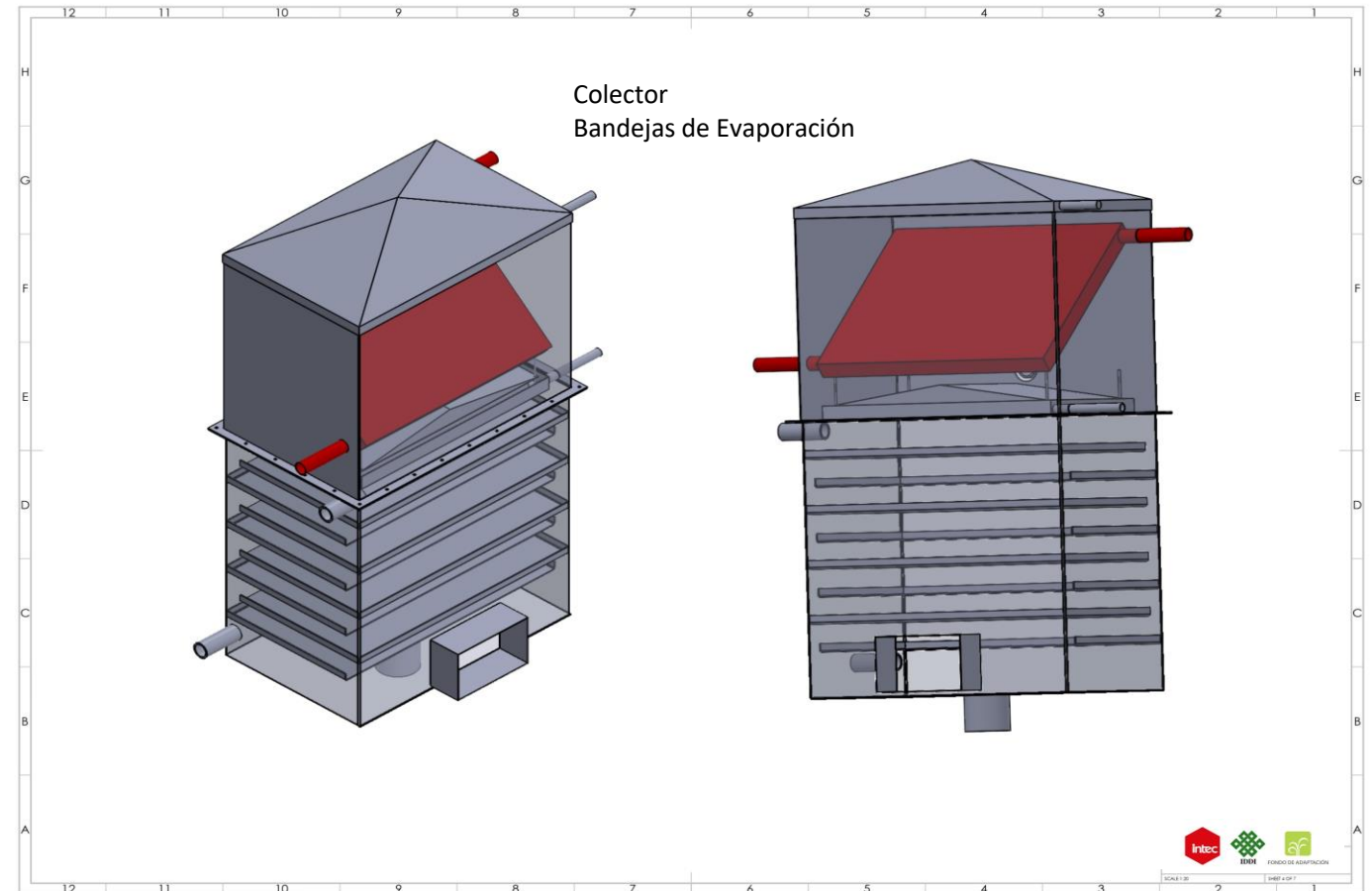
Colector: ensamble de tapa  
Prototipo de Desalinización Termo solar



Colector: vista lateral y detalles  
Prototipo de Desalinización Termo solar

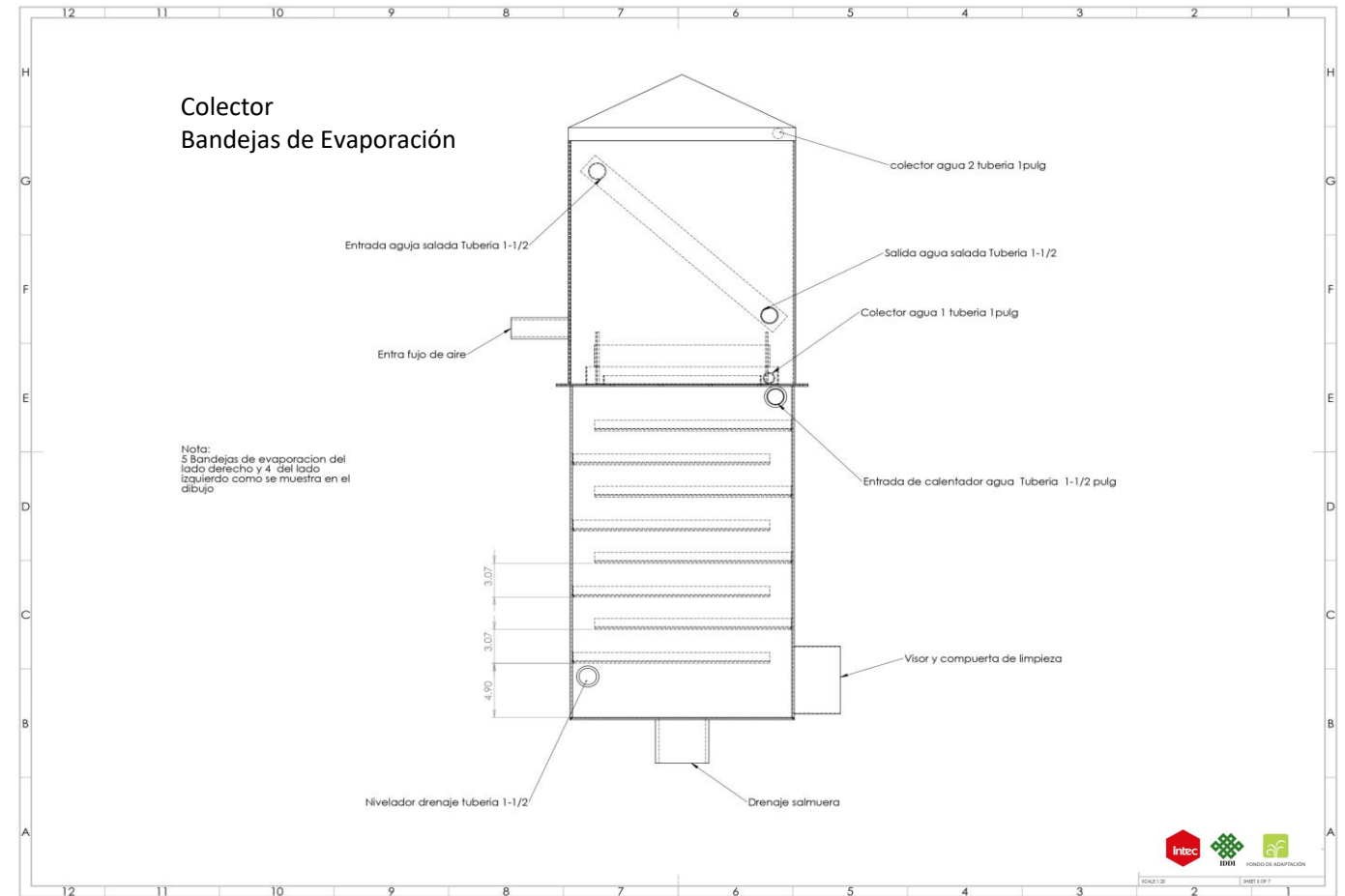


Colector y Bandejas de Evaporación (Detalle)  
Prototipo de Desalinización Termo solar

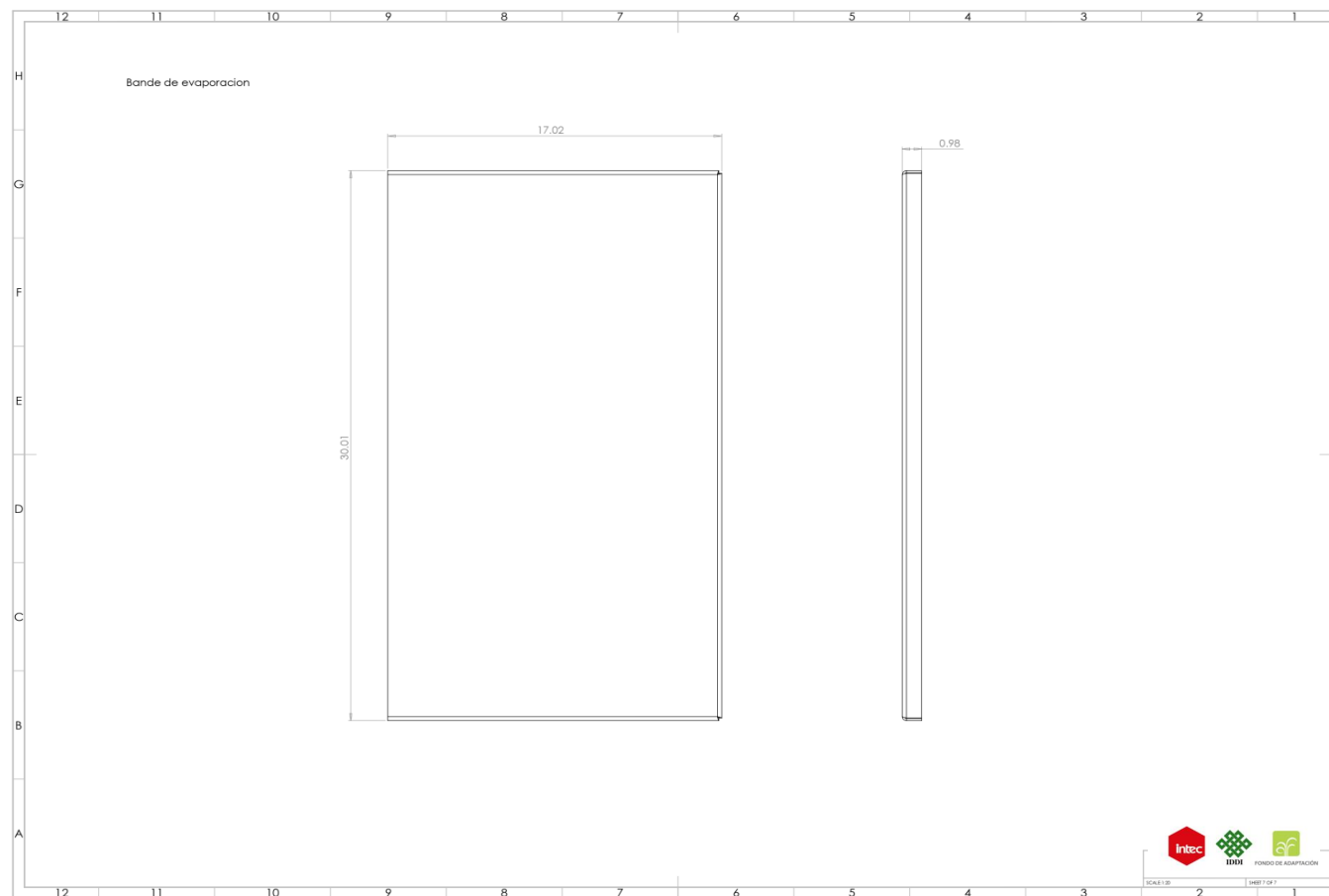




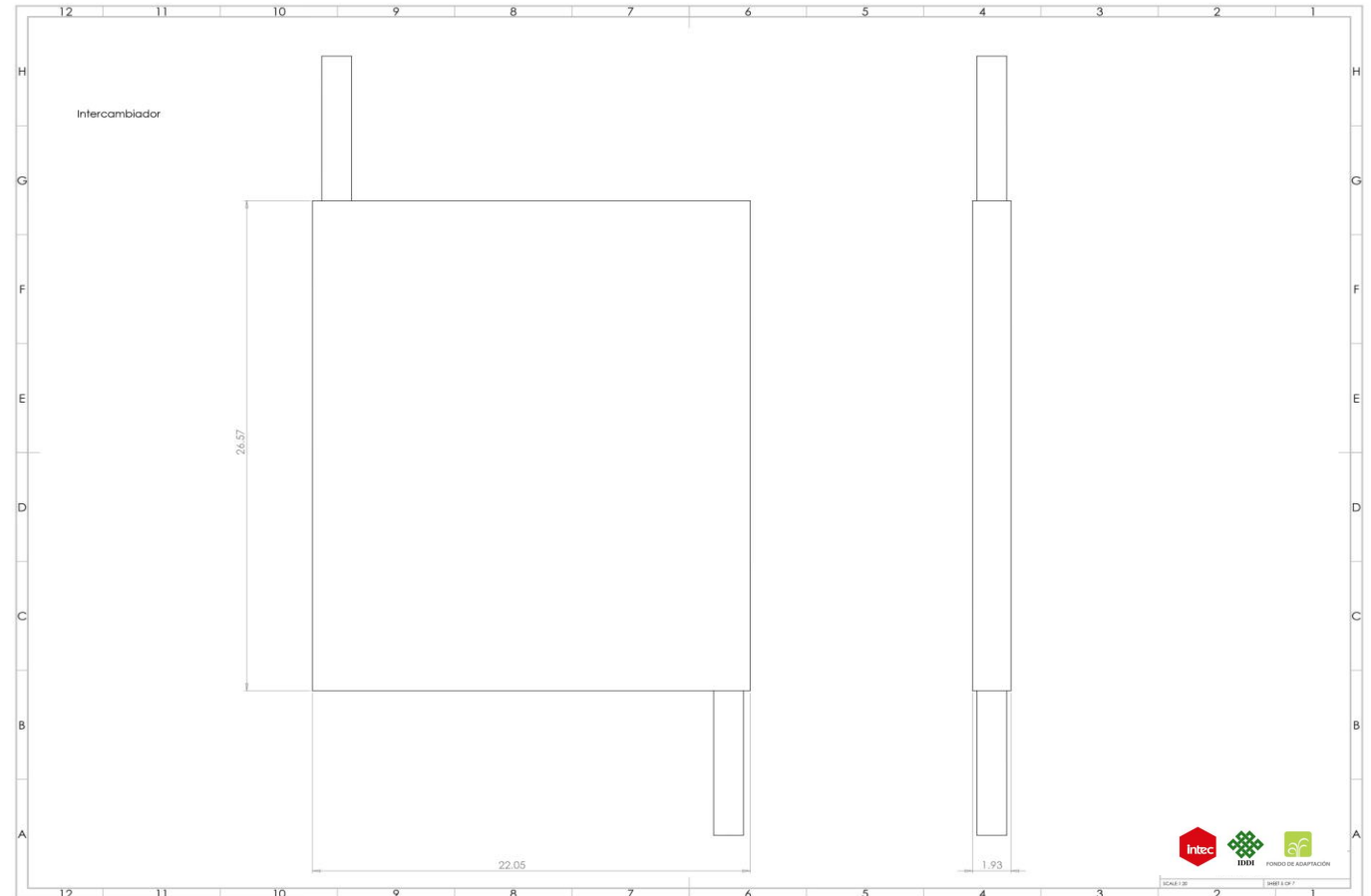
## Colector y Bandejas de Evaporación Prototipo de Desalinización Termo solar

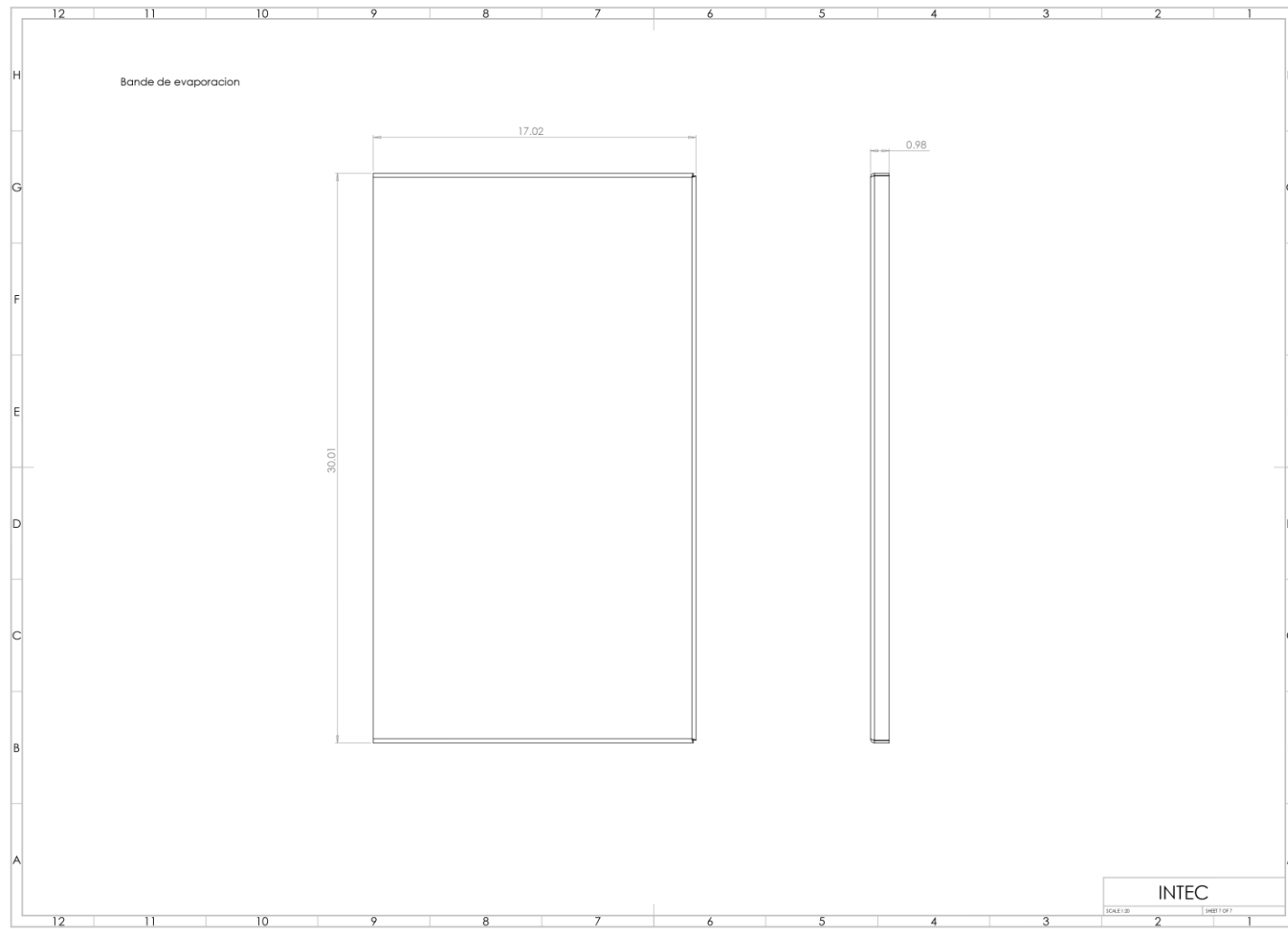


## Bandeja de Evaporación (Detalle) Prototipo de Desalinización Termo solar



Intercambiador (Detalle)  
Prototipo de Desalinización Termo solar





Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana

Pequeñas subvenciones a la innovación del FONDO DE ADAPTACIÓN



Acción, Innovación - Aprender y Compartir.



ADAPTATION FUND



IDDI

Appendix V.- Operation Manual and Instructions for Use of the Thermo-solar Desalination System

**Propuesta Técnica y Económica para la conceptualización, diseño y construcción de un prototipo escalable para desalación de aguas marinas y salobres con tecnología termo solar de baja capacidad para zonas rurales.**



**Manual de Funcionamiento e Instrucciones de Uso**

**Sistema de desalinización solar de agua**

Julio 2023



## Manual de Funcionamiento e Instrucciones de Uso

### Sistema de desalinización solar de agua

#### 1. Introducción

El sistema de desalinización de agua de mar por destilación es una tecnología para obtener agua desalinizada a partir de agua salada o salobre con el uso de la energía solar. Este manual tiene como objetivo proporcionar instrucciones detalladas sobre el funcionamiento y el uso del sistema.

#### 2. Descripción del desalinizador de agua solar

La figura 1 muestra una vista frontal del equipo y los detalles de sus componentes.

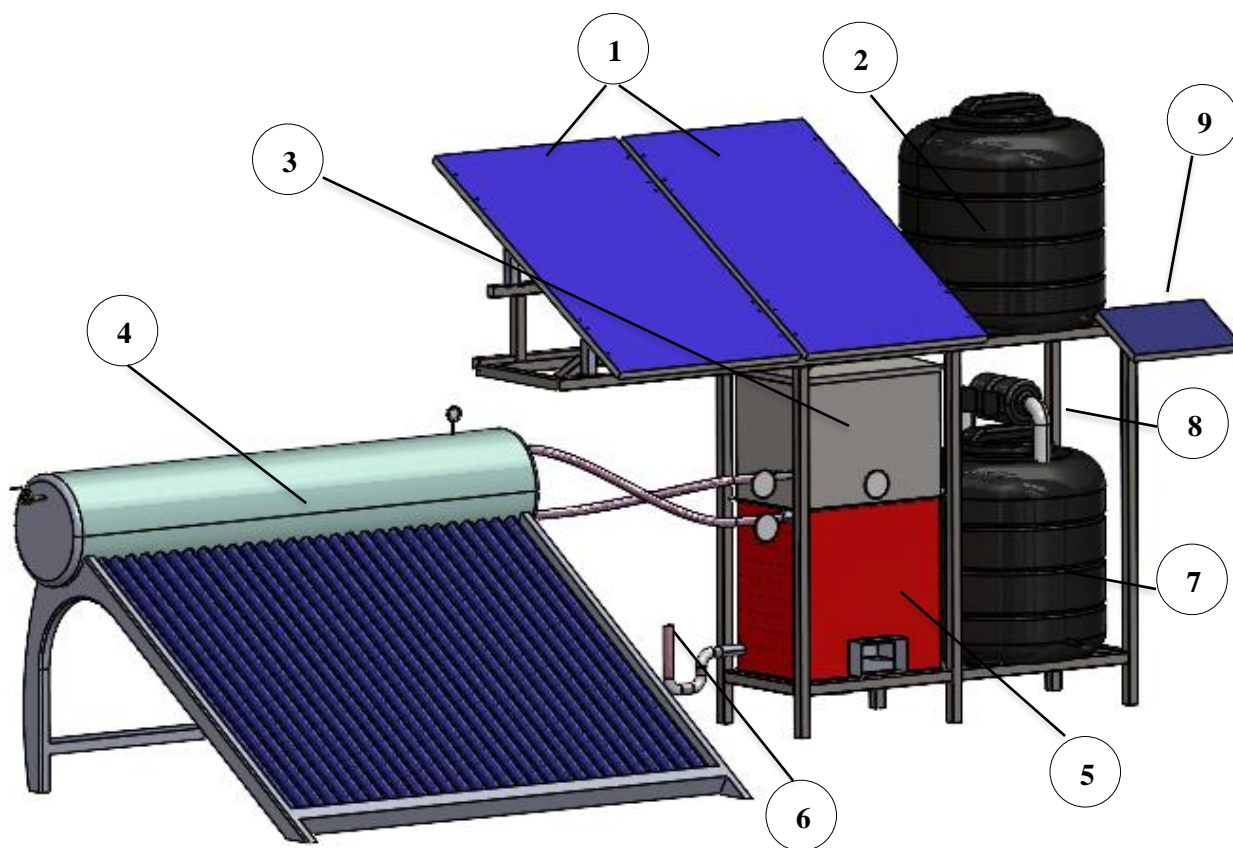
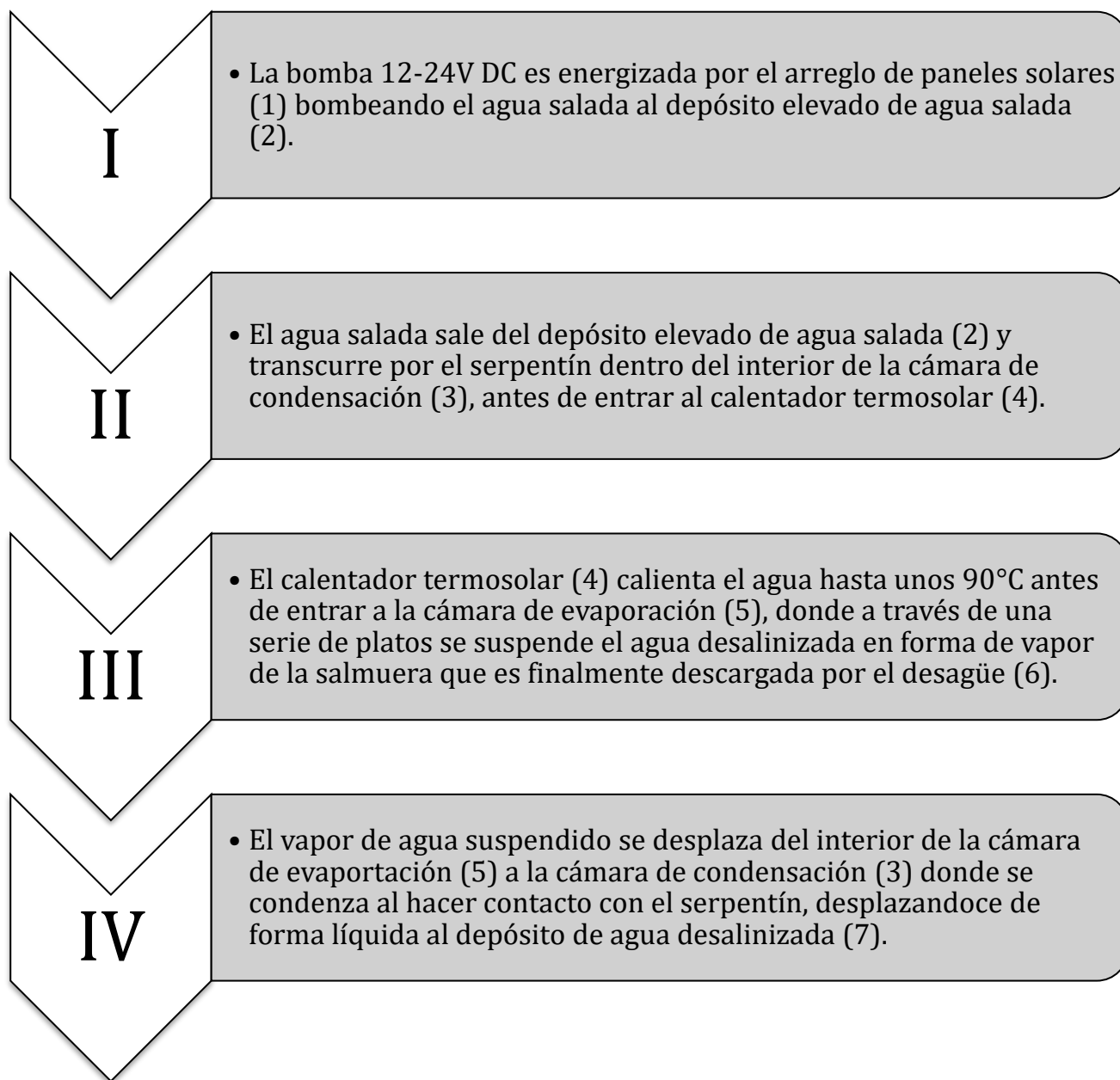


Figura 1: Sistema de desalinización solar de agua:

1 – Paneles fotovoltaicos del sistema de bombeo de agua salada; 2- Depósito de agua salada; 3 - Cámara de condensación; 4- Calentador termosolar; 5-Cámara de evaporación; 6 - Desagüe de salmuera -; 7 -Depósito de agua desalinizada; 8- Soplador; 9- Panel fotovoltaico del soplador.

### 3. Funcionamiento

#### Diagrama de funcionamiento



El tanque de agua salada (2) cuenta con un flotante para controlar el llenado con 500 litros, para lo que se emplea una bomba de agua alimentada con energía solar del arreglo de paneles (1).

En funcionamiento normal, el agua del tanque de agua salada (2) pasa al serpentín ubicado en la cámara de condensación (3), cumpliendo dos funciones, primero, ser reservorio térmico de baja temperatura ( $T_L$ )



para promover la condensación del vapor, y segundo, para precalentar el agua antes de ingresar al calentador termosolar.

El agua precalentada sale del serpentín y entra al calentador termosolar (4) donde se calienta hasta la temperatura de trabajo (aprox. 90°C). Del calentador termosolar (4) el agua pasa a las bandejas de la cámara de evaporación (5) donde el agua desalinizada se suspende en forma de vapor, subiendo por diferencia de densidad a la cámara de condensación. Mientras la salmuera continúa descendiendo por los platos de la cámara de evaporación (5) hasta que sale por el desagüe de salmuera (6).

El vapor de agua desalinizada presente en la cámara de condensación (3) al entrar en contacto con el serpentín de enfriamiento y con las paredes de la cámara de condensación (3) se condensa y desciende en forma líquida al tanque de agua destilada (7).

Para el control de parámetros del piloto se instalaron 5 termómetros: en el fondo del depósito de agua salada (2), en la cámara de condensación (3), a la salida del serpentín, en el calentador termosolar (4), a la entrada de la cámara de evaporación (5). La figura 2 muestra los 5 termómetros:



Figura 2: Termómetros para la medición de la temperatura. T<sub>1</sub>: termómetro en el (2) (en la parte de inferior trasera del depósito); T<sub>2</sub>: termopar en la CC. T<sub>3</sub>: termómetro a la salida del serpentín de la cámara de condensación entre (3) y (4); T<sub>4</sub>: termómetro en el calentador; T<sub>5</sub>: Termómetro a la entrada de la cámara de evaporación, entre (4) y (5).

#### **4. Uso del desalinizador de agua**

El desalinizador solar de agua es un equipo autónomo que emplea energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, para extraer agua desalinizada a partir de agua de mar o salobre. Los estudios de evaluación del agua desalinizada obtenida a partir de los procesos presentes en el equipo muestran que el agua resultante presenta una reducción significativa de su contenido de sales.

El equipo no se ha evaluado para el tratamiento de aguas residuales.

#### **5. Funcionamiento del desalinizador de agua.**

El funcionamiento del equipo es posible en el horario de radiación solar, a definir en dependencia de la zona geográfica. El horario medio recomendado es de 9 am a 5 pm.

##### **5.1 Puesta en marcha de la instalación**

El primer paso para poner en funcionamiento la instalación es llenar de agua el calentador solar. El llenado del calentador solar deberá hacerse cuando la temperatura del calentador solar vacío sea menor de 40 °C para evitar la fractura por estrés térmico de los tubos evacuados. El horario más recomendado es entre 6 pm y 7 am.

Para un funcionamiento óptimo de la instalación, la temperatura del agua en el calentador solar (4 en la figura 1) debe ser superior a 70 °C. La temperatura se podrá verificar en el termómetro T<sub>3</sub> (figura 2).

Para la puesta en marcha del desalinizador se debe llenar el tanque de agua salada (2) con ayuda de la bomba alimentada con energía producida por el arreglo de paneles solares (1).

Se debe verificar que la válvula de fondo de la cámara de evaporación (5) y de salida del tanque de agua desalinizada (7) estén cerradas (figura 1). Se deben abrir las válvulas entre el tanque de agua salada (2) y la cámara de condensación (3) y las ubicadas entre el calentador solar (4), las cámaras de evaporación (5) y de condensación (3).

Encender el soplador (8) ubicado sobre el tanque de agua desalinizada (7), para ello accionar interruptor del panel solar (9). El soplador eficientiza el proceso de condensación al crear un ligero vacío en el tanque



de agua destilada (7) que a su vez facilita el flujo del vapor desde la cámara de evaporación (5) a la cámara de condensación (3).

Para verificar el buen funcionamiento de la instalación se debe observar que por la válvula de desagüe de salmuera (6) en la cámara de evaporación esté fluyendo agua durante la operación del sistema.

La cámara de evaporación cuenta con un visor inferior para controlar el nivel de agua en el sistema y la posible precipitación de sales.

## 5.2 Parada de la instalación

Para detener el funcionamiento del se deben cerrar las válvulas entre el tanque de agua salada (2) y la cámara de condensación (3) y las ubicadas entre el calentador solar (4) y las cámaras de evaporación (5) y de condensación (3). Apagar el soplador (8) ubicado sobre el tanque de agua desalinizada (7), para ello accionar interruptor del panel solar (9).

## 6. Medidas de seguridad

En el funcionamiento del destilador solar de agua deberán observarse las siguientes medidas de seguridad:

- En el calentador solar (4) la válvula donde se encuentra el termómetro  $T_3$  deberá mantenerse SIEMPRE ABIERTA, pues es la que garantiza la presión constante en el equipo. Cerrar esa válvula puede provocar un aumento de la presión en el calentador solar y provocar la explosión de los tubos evacuados del calentador. Con el aumento de la temperatura es posible observar la salida de vapor de agua por esa válvula, esto no conlleva un mal funcionamiento, es la liberación de vapor del sistema para garantizar de que no aumentará la presión dentro del equipo.
- En la cámara de evaporación la válvula de desagüe de salmuera deberá mantenerse SIEMPRE ABIERTA, pues garantiza el sello de agua en la cámara de evaporación y que la misma no se inunde para permitir una adecuada evaporación del agua.
- Evitar contacto físico con las tuberías entre el calentador solar (4) y las cámaras de evaporación y condensación pues la temperatura podría ser superior a los 40 °C.
- Al apreciar formación considerable de sales en la cámara de evaporación (5) se debe proceder a detener el funcionamiento del sistema y proceder a su limpieza como se indica en el manual de

mantenimiento. Antes de proceder a limpiar evacuar el agua del sistema abriendo la válvula inferior de la cámara de evaporación (5).

- Evite manipular herramientas pesadas, escaleras y otros utensilios cerca del calentador solar. En caso de hacerlo por necesidad, retírelos del área una vez terminado los trabajos para evitar rotura de los tubos por accidente.
- Cumplir con las indicaciones establecidas en el manual de mantenimiento, respetando los plazos establecidos para el mantenimiento del equipo y sus partes

## 7. Posibles fallas y vías de solución

Para evitar o disminuir las posibles fallas de funcionamiento del equipo, debe cumplirse con las indicaciones de mantenimiento que se describen en el Manual de Mantenimiento de la instalación. No obstante, algunas fallas posibles y su vía de solución se reflejan en la tabla 1.

Tabla 1. Posibles fallas de funcionamiento del desalinizador solar y vía de solucionarla. Los códigos responden a los equipos o instrumentos de las figuras 1 y 2.

Falla	Posible vía de solución
Calentador Solar (4): Goteo en los tubos de calentamiento	Revisar la el sello de unión entre el tubo evacuado y el tanque del calentador. Si el problema persiste cambiar sello.
Termómetros: No varía la temperatura del termopar	Revisar el termómetro y en caso de detectar avería cambiarlo.
Bomba de agua del depósito de agua salada (2): la bomba de agua no arranca	Revisar si el interruptor de arranque está encendido. La radiación solar que llega al panel no es suficiente, en tal caso esperar a que aumente la radiación solar. Revisar el circuito eléctrico y de encontrar algún problema solucionarlo.
Bomba de agua del depósito de agua salada (2): el agua no sube al tanque	Verificar que no haya aire en la línea. Revisar el sello hidráulico del sistema hidráulico a la entrada de la bomba.

<p>Soplador del tanque de agua destilada (7): no arranca el soplador</p>	<p>Revisar si el interruptor de arranque está encendido. La radiación solar que llega al panel no es suficiente, en tal caso esperar a que aumente la radiación solar. Revisar el circuito eléctrico y de encontrar algún problema solucionarlo.</p>
<p>Tanque de agua destilada (7): no fluye agua destilada al tanque de agua destilada</p>	<p>Inyectar agua a presión a la cámara de condensación, por bombeos directo al sistema de compensación del tanque de agua salada (2). La temperatura del agua en el calentador solar está por debajo de 50 °C y ha disminuido la eficiencia de evaporación. Parar la instalación. Revisar que las válvulas estén abiertas según indica la secuencia de puesta en marcha de la instalación.</p>
<p>Cámara de evaporación (3): no fluye agua por la válvula de desagüe de salmuera (6)</p>	<p>Inyectar agua a presión a la cámara de condensación, por bombeos directo al sistema de compensación del tanque de agua salada T1. La temperatura del agua en el calentador solar está por debajo de 50 °C y ha disminuido la eficiencia de evaporación. Parar la instalación. Podría estar tupida por acumulación de sales en la cámara de evaporación. Revisar que las válvulas estén abiertas según indica la secuencia de puesta en marcha de la instalación Detener el funcionamiento del servicio del sistema y proceder a la limpieza como establece el manual de mantenimiento</p>



Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana

Pequeñas subvenciones a la innovación del FONDO DE ADAPTACIÓN



Acción, Innovación - Aprender y Compartir.

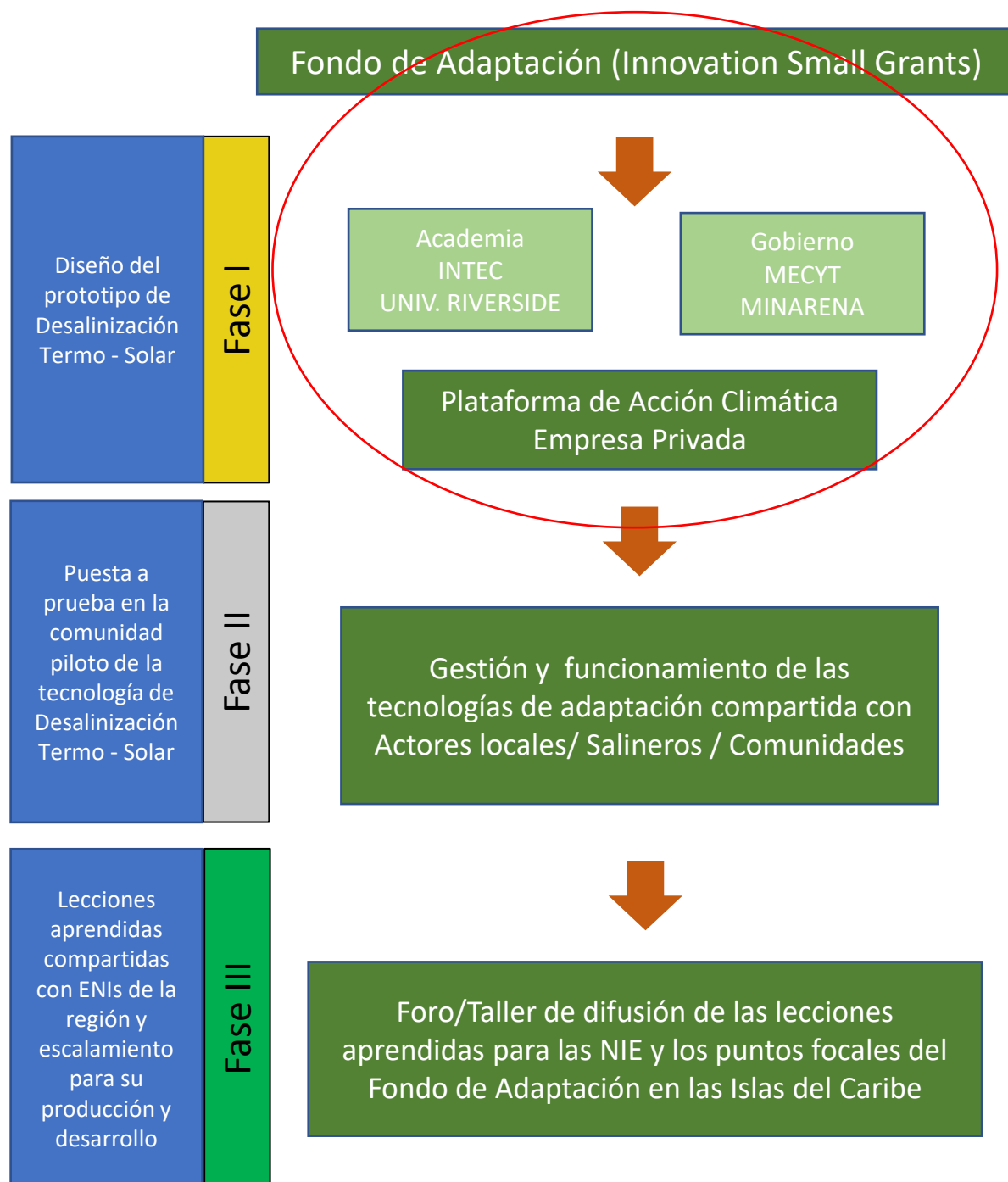


ADAPTATION FUND



IDDI

Appendix VI.- Infographics and Workshop Presentations



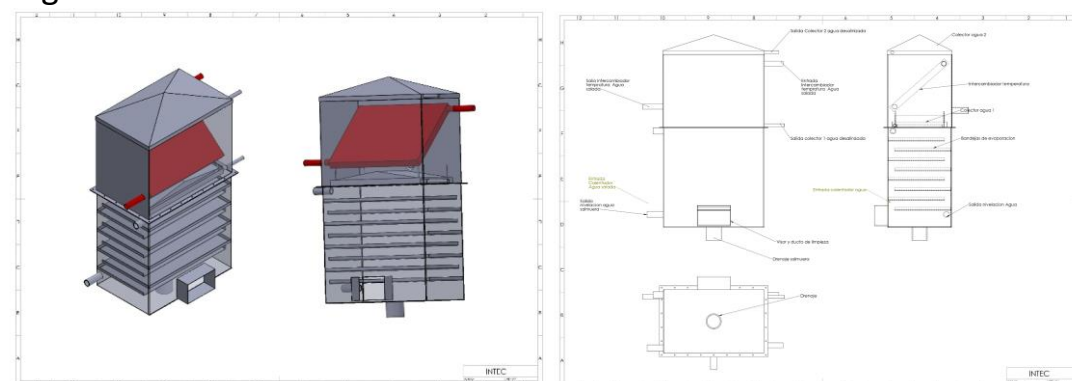
## Prototipo escalable

Capacidad de agua potable: 250 L/día

Eficiencia de producción de agua potable del prototipo (Agua potable/agua salada): 11-15%

**Tiempo de trabajo diario:** según tiempo de radiación solar, en RD: 7 horas / Energéticamente autónomo.

**Huella de carbono de operación:** sin emisión de CO2 ni otros gases de efecto invernadero.







Fortalecimiento de un micro  
ecosistema replicable de  
innovación tecnológica  
acelerada para la adaptación  
al cambio climático en la  
República Dominicana

Innovation Small Grant - AF





- 40 años de experiencia en gestión de proyectos con financiación de donantes nacionales e internacionales, bancos, empresas y gobiernos. Está acreditada como la única Entidad Nacional de Implementadora (ENI) dominicana del Fondo de Adaptación.
- Capacidad de reunir actores locales, nacionales, regionales e internacionales para formar alianzas para el desarrollo sostenible (agua, energía, agricultura, turismo, etc.).
- Más de 20 años trabajando en iniciativas binacionales con experiencias en Haití y Cuba.
- Desde el 2011 lidera el Centro de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible.



El objetivo general del proyecto es la aceleración del desarrollo de tecnologías para la adaptación al cambio climático de las zonas marino-costeras, especialmente en los países insulares (grandes y PEID).

### Problemas asociados:

Los países, especialmente los insulares como la República Dominicana, se enfrentan a diversos impactos del cambio climático, como el aumento de la temperatura, los cambios en los patrones de lluvia que conducen a un aumento de las sequías y las inundaciones, la subida del nivel del mar y el aumento de la intensidad y la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos.

Esto afecta gravemente a todos los aspectos sociales y económicos de la sociedad, incluyendo la disponibilidad de recursos naturales y la seguridad de los medios de vida, amenazando la producción agrícola, los sistemas alimentarios, la disponibilidad de agua, así como la salud y la seguridad de las personas.



Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana





## Desalinización Termo Solar Fases de implementación



**Fase I:** Implementación de un micro ecosistema de tecnologías de adaptación al cambio climático.

(Este ecosistema implica el diseño y el establecimiento de un sistema innovador para el uso de tecnologías amigables con el medio ambiente – Elaboración y prueba de un desalinizador termo-solar)

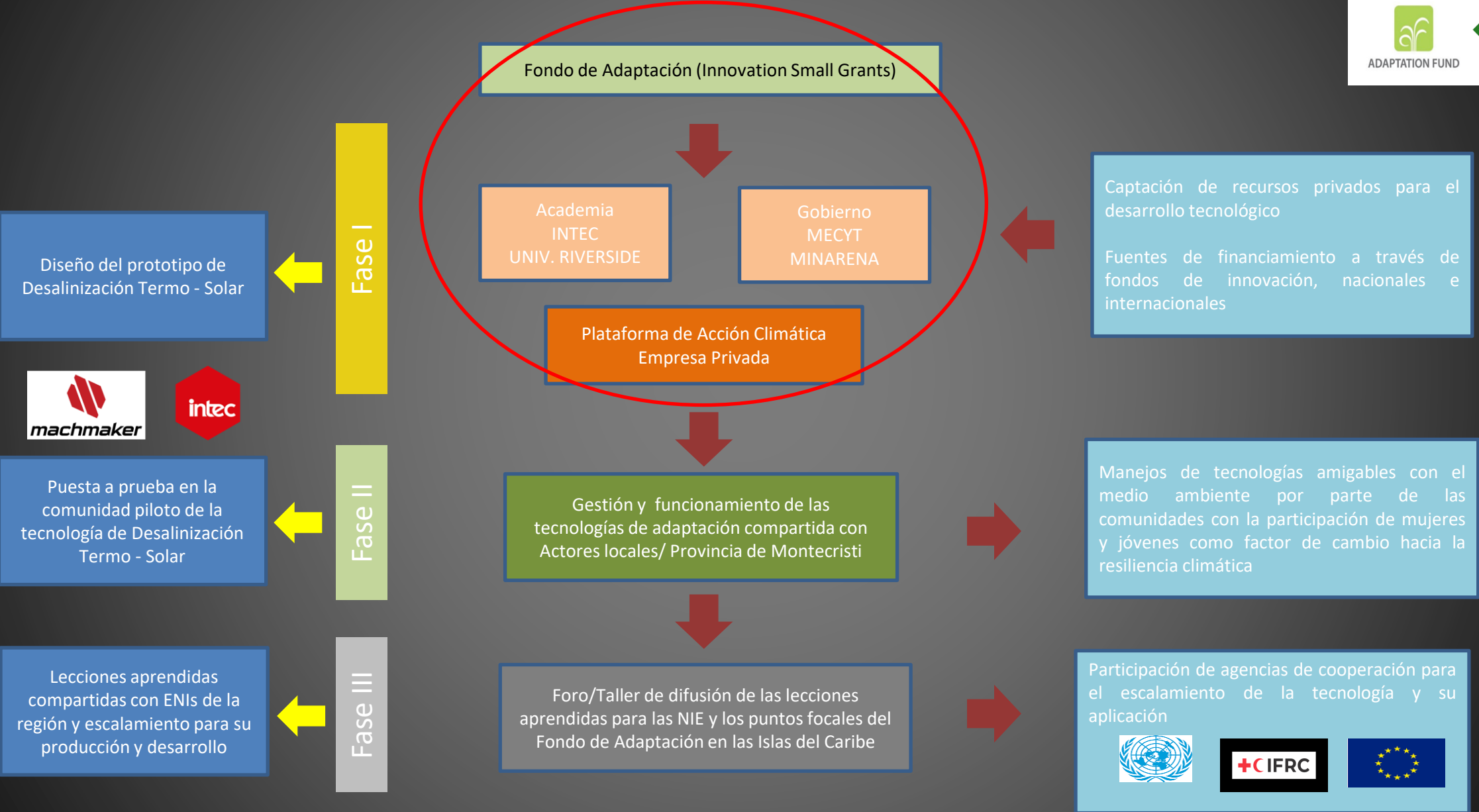
**Fase II:** El diseño y establecimiento de un proceso para probar las tecnologías de adaptación en las comunidades costeras marginadas, incluyendo la selección y sensibilización de las comunidades piloto, y la formación de estas comunidades para la gestión y el funcionamiento de las tecnologías de adaptación.

Esta Fase incluye la definición y el establecimiento de un mecanismo disruptivo para la organización del tejido social con la participación de la mujer como factor de cambio.

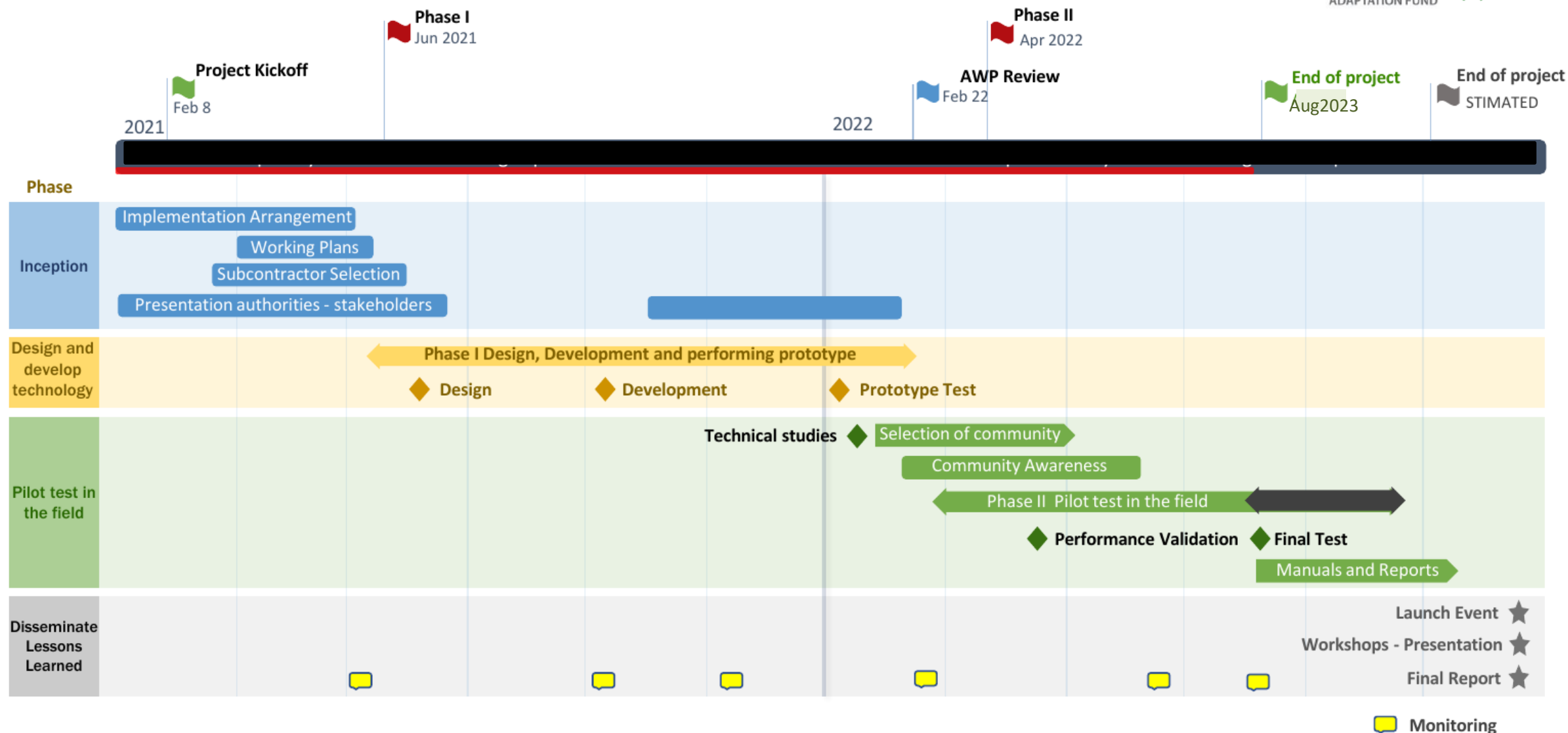
**Fase III:** Proceso de gestión del conocimiento para captar y difundir las lecciones aprendidas.

(Foro para ENIs de países insulares de la región)

Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana



# Project: "Strengthening of a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climate change adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo Solar Desalination appropriate technology" Road-map



# GRACIAS

AF-IDDI



**IDDI**

INSTITUTO DOMINICANO  
DE DESARROLLO INTEGRAL, INC.

HACIENDO UN MEJOR  
MAÑANA....

Instituto Dominicano de Desarrollo Integral, Inc. IDDI





# PROTOTIPO DE DESALINIZADOR TERMO-SOLAR DE AGUA

Prof. Ulises Jáuregui-Haza  
INTEC







FONDO DE ADAPTACIÓN



*machmaker*



# EL PROYECTO

**“Fortalecimiento de un Micro Ecosistema Replicable para el Desarrollo Acelerado de Tecnologías para la Adaptación al Cambio Climático, a través del desarrollo de un proyecto piloto de Desalinización Termo Solar”**

**Financiado por: Fondo de Adaptación**

**Entidad Implementadora Nacional: IDDI**

**Ejecutor del prototipo: INTEC**



FONDO DE ADAPTACIÓN



***machmaker***

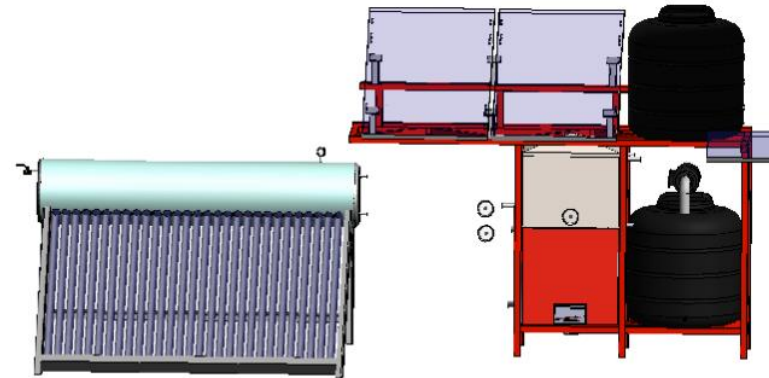
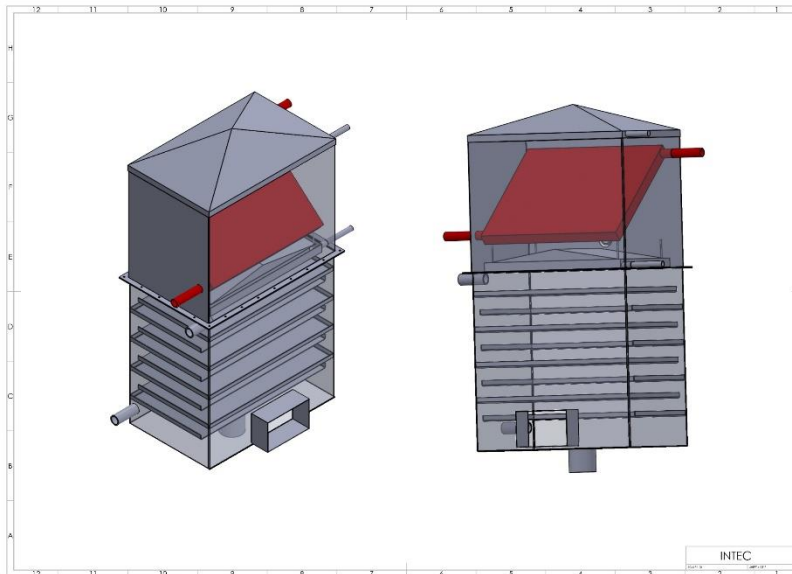
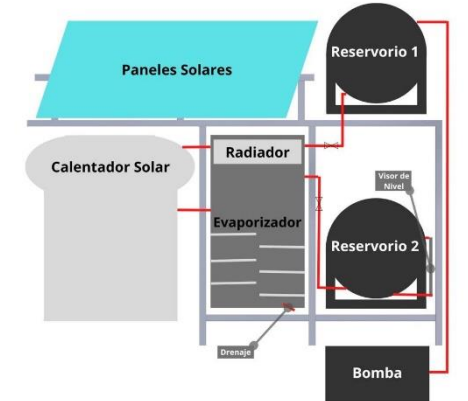
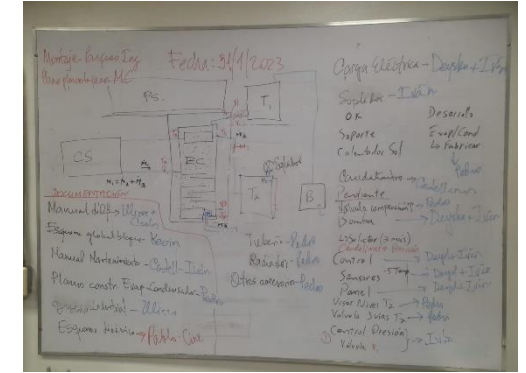
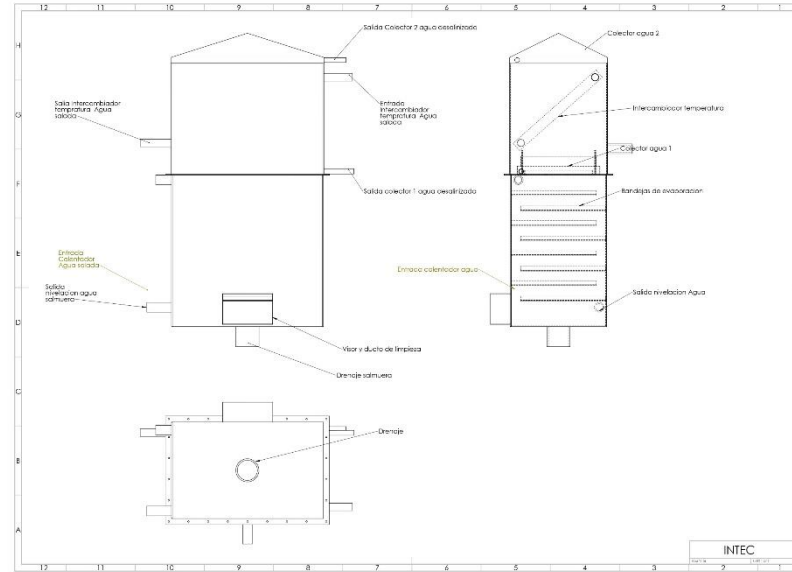
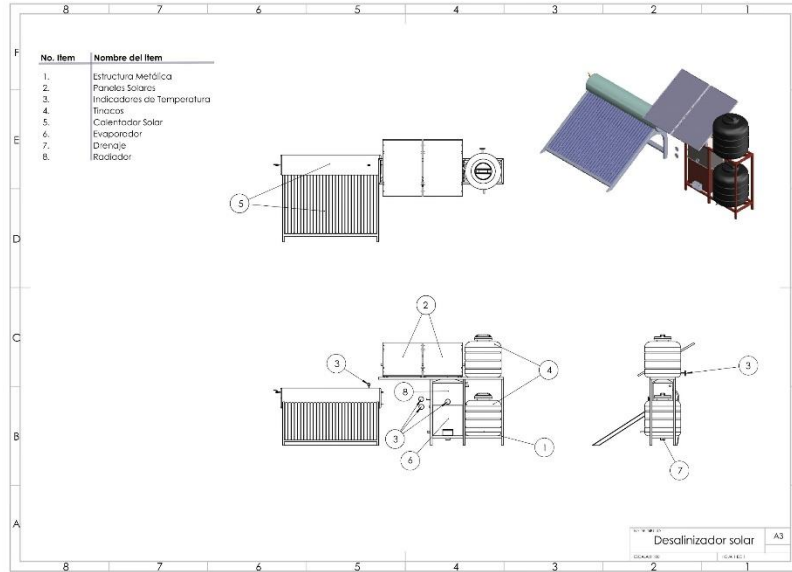


# OBJETIVO

Evaluar un sistema piloto de generación distribuida de agua potable basado en la desalinización termo-solar.



# DISEÑO







FONDO DE ADAPTACIÓN



***machmaker***



# LA CONSTRUCCIÓN







FONDO DE ADAPTACIÓN



# EL MONTAJE







FONDO DE ADAPTACIÓN



***machmaker***



# EL PROTOTIPO



T1: Tanque de agua salada;

T2: Tanque de agua destilada;

DS: Desagüe de salmuera;

CC: Cámara de condensación;

CE: Cámara de evaporación;

CS: Calentador solar;

PS1: Paneles solares para la alimentación de la bomba

PS2: Panel solar para la alimentación del soplador del T2.



# PRUEBA PLATAFORMA INTEC



Parámetro	23/3/2023	24/3/2023	27/3/2023
Tiempo de operación, min	105	135	170
Tiempo inicio destilación, min	20	25	19
Flujo de agua en DS, L/min	2,019	1,615	1,471
Flujo de agua destilada, L/min	0,267	0,237	0,176
Volumen de agua tratada, L	240	250	280
Volumen de agua destilada, L	28	32	30
Eficiencia de la destilación, %	11,7	12,8	10,7

**11,7±1,1 %**





# PRUEBA PLATAFORMA INTEC

Parámetro	23/3/2023	24/3/2023	27/3/2023	Promedio
Conductividad entrada, $\mu\text{S}/\text{cm}$	536	514	604	$551 \pm 47$
Conductividad salida, $\mu\text{S}/\text{cm}$	102	46,8	42,3	$63,7 \pm 33,2$
Salinidad entrada, %	0,26	0,25	0,29	$0,27 \pm 0,02$
Salinidad salida, %	0,02	0,02	0,02	$0,02 \pm 0,00$
% de desalinización	92,3	92	93,1	$92,5 \pm 0,6$





FONDO DE ADAPTACIÓN



*machmaker*



# PRUEBA ACUARIO NACIONAL

Parámetro	21/6/2023	11/7/2023
Tiempo de operación, min	90	95
Tiempo inicio destilación, min	26	28
Flujo de agua en DS, L/min	1,826	1,528
Flujo de agua destilada, L/min	0,224	0,215
Volumen de agua tratada, L	164	145
Volumen de agua destilada, L	20	21
Eficiencia de la destilación, %	12,3	14,1

**13,2±1,3 %**







FONDO DE ADAPTACIÓN



***machmaker***



# PRUEBA ACUARIO NACIONAL

Parámetro	21/6/2023	11/7/2023	Promedio
Conductividad entrada, $\mu\text{S}/\text{cm}$	46500	47400	$46950 \pm 636$
Conductividad salida, $\mu\text{S}/\text{cm}$	8,48	11,17	$9,82 \pm 1,90$
Salinidad entrada, %	30,3	30,9	$30,6 \pm 0,4$
Salinidad salida, %	0	0	0
% de desalinización	100	100	100





FONDO DE ADAPTACIÓN



*machmaker*



# CIFRAS GENERALES

**Prototipo escalable**

**Capacidad de agua potable: 250 L/día**

**Eficiencia de producción de agua potable del prototipo  
(Agua potable/agua salada): 11-15%**

**Tiempo de trabajo diario: 7 horas**

**Energéticamente autónomo**

**Huella de carbono de operación:**

**sin emisión CO<sub>2</sub> ni otros gases de efecto invernadero**



IDDI



FONDO DE ADAPTACIÓN



***machmaker***



# AGRADECIMIENTOS



## Equipo Técnico:

Pedro Disla

Juan E. Castellanos

Iván Jiménez

Deyslen Mariano

Kevin María

Randy Capellán

Carlos Sanlley

Ulises Jáuregui-Haza

## Equipo Administrativo:

Manuel Santana

Francheska Mata



IDDI

Pedro Zuccarini

Kendy Peña

Joselito Herrera

David Luther



FONDO DE ADAPTACIÓN



***machmaker***



ACUARIO NACIONAL

República Dominicana





# PROTOTIPO DE DESALINIZADOR TERMO-SOLAR DE AGUA

13 de julio 2023





# Fortalecimiento de un micro ecosistema replicable de innovación tecnológica acelerada para la adaptación al cambio climático en la República Dominicana

Pequeñas subvenciones a la innovación del FONDO DE ADAPTACIÓN



Acción, Innovación - Aprender y Compartir.



***Instituto Dominicano de Desarrollo Integral, Inc.***

18 October, 2023

The Adaptation Fund Board  
1818 H Street NW, MSN N7-700  
Washington DC, 20433 USA  
Email: [afbsec@adaptation-fund.org](mailto:afbsec@adaptation-fund.org)

**Subject: Presentation of Final Report**

**“Strengthening of a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climate change adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo-Solar Desalination appropriate technology”.**


Dear Adaptation Fund Board.

Please find attached to this email the Final Report of the Innovation Small Grant Project: “Strengthening of a replicable micro ecosystem for accelerated development of technologies for climate change adaptation of the Dominican Republic through the development of a pilot Thermo-Solar Desalination appropriate technology” with the following documents:

1. Letter Final Report Innovation Project AF,
2. Project Completion Final Report Summary Innovation Report AF,
3. PPR2 - Final Financial Report Innovation Project AF,
4. Appendix I. Inception Workshop Report,
5. Appendix II. Project Staff List,
6. Appendix III. Reports and evaluation of the Prototype by Dominican Universities,
7. Appendix IV. Prototype designs and technical information,
8. Appendix V. Operation Manual and Instructions for Use of the Thermo-solar Desalination System and
9. Appendix VI. Infographics and Workshop Presentations.

As always, thank you for your support.

Best Regards,

  
David Luther  
Executive Director

