

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LOS DESALINIZADORES SOLARES TIPO GABINETE SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS A TRAVÉS DE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Bachilleres  
**Rojas Carvajal, Tomás Emilio**  
**Rosales Méndez, Mario José**  
Para optar al título de Ingeniero Mecánico

**Caracas, 2013**

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LOS DESALINIZADORES SOLARES TIPO GABINETE SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS A TRAVÉS DE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL**

**Tutor académico: Prof. Johane Bracamonte**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Bachilleres  
**Rojas Carvajal, Tomás Emilio**  
**Rosales Méndez, Mario José**  
Para optar al título de Ingeniero Mecánico

**Caracas 2013**



Facultad de Ingeniería  
INGENIERIA MECÁNICA  
Universidad Central de Venezuela  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA

Caracas, 06 noviembre de 2013

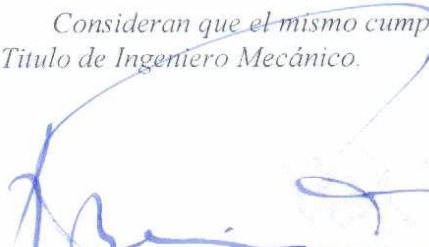
## ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

*Rojas C. Tomas E. y Rosales M. Mario J.*

Titulado: “*Análisis del Rendimiento de los Desalinizadores Solares Tipo Gabinete Según sus Características Geométricas a Través de un Estudio Experimental*”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

  
Prof. *Rodolfo Berrios*  
Jurado



  
Prof. *Miguel Baritto*  
Jurado

  
Prof. *Johane Bracamonte*  
Tutor

“50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales”



Facultad de Ingeniería  
INGENIERIA MECÁNICA  
Universidad Central de Venezuela  
Departamento de Energética



Caracas, 06 de noviembre de 2011

Ciudadana  
Profa. Norma Guzmán  
Jefe de División de Control de Estudios  
Presente.

Quienes suscriben profesores del Jurado Examinador, designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted, con la finalidad de informarle la decisión de otorgar a el (los) bachiller(s):

*Rojas C. Tomas E. y Rosales M. Mario J.*

*Titular de la Cédula de Identidad N° 19.692.859 y 19.561.167 respectivamente*

**“MENCION TRABAJO ESPECIAL DE GRADO”**


Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado Titulado:


*“Análisis del Rendimiento de los Desalinizadores Solares Tipo Gabinete Según sus Características Geométricas a Través de un Estudio Experimental”*

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted.

  
Prof. *Miguel Baritto*  
Jurado



  
Prof. *Rodolfo Berrios*  
Jurado

  
Prof. *Johane Bracamonte*  
Tutor

“Núcleo de Ingeniería “Armando Mendoza” hacia el 30° Aniversario”

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente queremos agradecer a la ilustre Universidad Central de Venezuela, nuestra alma mater, donde crecimos como personas y cumplimos esta meta de formarnos como Ingenieros.

También queremos agradecer a nuestro tutor, Johane Bracamonte, quien fue ejemplo e invaluable guía durante todo el desarrollo del presente trabajo.

Queremos agradecer también a nuestro jurado, los profesores Miguel Baritto y Rodolfo Berrios, al primero por duplicado por también ser guía del proyecto termosolar del cual formamos parte.

Agradecemos a nuestros compañeros Allan Coursey y Mariana Fraute con quienes compartimos el espacio e intercambiamos apoyo y ayuda durante estos meses, a Antonio Nieves, Francisco Varela y Jorge Varela quienes nos brindaron su experticia a la hora de la construcción de los desalinizadores cuando requerimos de ayuda y a todos nuestros compañeros de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Central de Venezuela que de una forma u otra nos ayudaron a alcanzar esta meta.

Tomás:

Quiero agradecer a mi familia, a mis padres Ana y Humberto, a mi hermano Francisco a mi madrastra Ana Lissett, a mi hermanastra Camila y a todos mis familiares quienes me apoyaron durante todo este proceso.

Mi más profundo agradecimiento también a Mario y a su familia, ya que sin el trabajo en equipo hubiese sido imposible alcanzar esta meta, fueron meses de arduo trabajo que dieron frutos.

Por ultimo quiero agradecer a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela y a todo el equipo de Formula SAE UCV donde aprendí gran parte de los conocimientos y habilidades que me permitieron aportar a la construcción de este trabajo.

Mario:

Agradezco a mis padres Mario Rosales y Luz Gardenia, a mi hermana Mariluz Rosales y a mi novia Mariajose Guevara por todo el apoyo que recibí de su parte.

Quiero agradecer especialmente a mi compañero de tesis Tomas Rojas por ser una pieza clave en el desarrollo de este trabajo y a su familia por el apoyo brindado.

Finalmente les doy las gracias al ingeniero Vizcaya y a todo su equipo por la asesoría técnica que facilito el desarrollo de este trabajo.

## **RESUMEN**

**ROJAS C. TOMAS E., ROSALES M, MARIO J.**

### **ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LOS DESALINIZADORES SOLARES TIPO GABINETE SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS A TRAVÉS DE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL**

**Tutor académico Prof. Johane Bracamonte. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica. 2013, 80 páginas.**

**Palabras Claves: Desalinización Solar, Destilación Termosolar, Potabilización de Agua, Fibra de Vidrio.**

El presente trabajo constituye la segunda etapa de un proyecto del Departamento de Energética de la Universidad Central de Venezuela enfocado en desalinización solar, tras el modelado matemático a cargo de Stephany (2012) Tiene por objeto diseñar y construir una serie de desalinizadores solares de tipo gabinete a pequeña escala con ciertos parámetros geométricos variables pero sin modificar su área de colección, a fin de establecer la influencia de los parámetros de diseño geométricos mencionados sobre el desempeño del desalinizador. Se tomaron 3 ángulos: 10°, 20° y 30°, y tres relaciones largo/ancho para la cubierta de vidrio: 0,67, 1 y 1,5 y se construyeron las 9 combinaciones entre las dos variables para ser puestas a prueba. Se usó fibra de vidrio para la construcción del casco, tuberías flexibles de PVC para el canal de recolección, vidrio para la cubierta transparente y poliuretano compactado para la cubierta aislante. Se diseñaron e implementaron sistemas de alimentación, recolección, control de altura para la bandeja de agua, se instrumentó todo el arreglo con termocuplas y se colocó un medidor de radiación solar para comparar la producción con la disponibilidad de energía. En el experimento se colocaron los equipos por 2 semanas al sol y se midió su producción diurna y nocturna. Se compararon las dos producciones y los totales diarios, se calcularon rendimientos y se analizó el comportamiento térmico. Se consiguió que la mayoría de la producción de los desalinizadores ocurre durante la noche mientras éste se enfría ya que a pesar de que la combinación de 10° y 0,67 de proporción produjo más durante el día, el mejor durante la noche (30° y 0,67 de proporción) produjo más sobre las 24 horas. Se concluyó asimismo que los de relación 0,67 fueron más efectivos.

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

### LETRAS GRIEGAS

$\alpha$ : Ángulo formado entre la posición del zénit y la posición del sol en el momento de la observación.

$\delta$ : Ángulo de incidencia solar.

$\mu_l$ : Viscosidad dinámica [Pa.s].

$\eta$ = Eficiencia.

$\mu_{f,g}(T_0)$ = Calor latente de vaporización del agua a 30°C [J/Kg].

$\phi$ : Ángulo respecto al plano horizontal de la superficie colectora.

$\rho_g$ : Reflectividad del vidrio, adimensional.

$\rho_l$ : Densidad del líquido [Kg/m<sup>3</sup>].

$\rho_v$ : Densidad del vapor [Kg/m<sup>3</sup>].

$\Theta$ : Ángulo respecto al plano vertical de la superficie colectora.

### SÍMBOLOS

$A_b$ : Área de base del desalinizador.

$A_a$ : Área de apertura [m<sup>2</sup>].

$A_g$ : Área del vidrio [m<sup>2</sup>].

$g$  : Aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>].

$G$ : Irradiación solar [kW/m<sup>2</sup>].

$h_L$ : Coeficiente convectivo [W/ m<sup>2</sup>K].

$i_{fg}$ : Entalpía de vaporización [J/Kg].

$i_{sat,f}$ : Entalpía específica del líquido saturado a la temperatura del vidrio [J/Kg].

$I'$ : Irradiación solar disponible [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$k_l$ : Conductividad térmica del líquido [ $\text{W}/\text{mK}$ ].

$L$ : Longitud del vidrio [ $\text{m}$ ].

$M$ : Masa de Aire, adimensional.

$M_c$ : Es la rata de flujo de masa del agua condensada [ $\text{Kg}/\text{s}$ ].

$\Delta P$ : Caída en la presión de saturación [ $\text{kPa}$ ].

$P_v$ : Presión de Vapor [ $\text{kPa}$ ].

$P_1$ : Presión parcial de vapor de un componente de una solución [ $\text{kPa}$ ].

$P_1^0$ : Presión de vapor de un componente puro [ $\text{kPa}$ ].

$P_{\text{solución}}$ : Presión de vapor de una solución [ $\text{kPa}$ ].

$q_h$ : Calor que se convecta del vidrio al ambiente [ $\text{W}$ ].

$q_{\text{rad},:}$ : Calor que se irradia del vidrio al ambiente [ $\text{W}$ ].

$q_{\text{rad},l}$ : Calor irradiado del agua hacia el vidrio.

$RL$ : Relación de longitud largo entre ancho, adimensional.

$T$ : Temperatura (General) [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$X_1$ : Fracción molar de un componente en una disolución, adimensional.

$X_2$ : Fracción molar del soluto, adimensional.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</b> .....	<b>VIII</b>
LETRAS GRIEGAS .....	VIII
SÍMBOLOS .....	VIII
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>3</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del Problema .....	3
1.2 Objetivos y Alcances .....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
1.3 Alcances y Limitaciones.....	5
1.3.1 Alcances .....	5
1.3.2 Limitaciones .....	5
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>6</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1 Desalinización .....	6
2.2 Presión de vapor .....	6
2.2.1 Influencia de la temperatura .....	6
2.2.2 Influencia de la naturaleza del líquido.....	7
2.2.3 Influencia del soluto .....	7
2.3 Destilación .....	8
2.4 Destiladores solares .....	8
2.4.1 Clasificación de los sistemas de destilación solar .....	8

2.5 Masa de Aire.....	13
2.6 Irradiación.....	14
2.7 Insolación .....	14
2.8 Día solar.....	14
2.9 Análisis dinámico .....	15
2.10 Ángulo de inclinación e incidencia .....	15
2.11 Latitud.....	16
2.12 Declinación.....	16
2.13 Ángulo acimutal de la superficie .....	16
2.14 Ángulo horario.....	17
2.15 Ángulo cenital y altitud solar.....	17
2.16 Ángulo acimutal solar.....	17
2.18 Modelo termodinámico.....	17
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>21</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL BANCO DE PRUEBAS .....</b>	<b>21</b>
3.1 Diseño del banco de prueba.....	21
3.1.1 Características generales.....	21
3.2 Materiales utilizados.....	24
3.3 Construcción.....	26
3.3.1 El Casco.....	26
3.3.2 El canal de recolección .....	30
3.3.3 El Sello de Goma.....	31
3.3.4 El Aislante .....	31
<b>CAPITULO 4 .....</b>	<b>32</b>
<b>INSTRUMENTACIÓN.....</b>	<b>32</b>
<b>CAPITULO 5 .....</b>	<b>44</b>
<b>METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....</b>	<b>44</b>

3.1 Instalación.....	44
3.2 Recolección de datos. ....	46
<b>CAPITULO 6.....</b>	<b>48</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
ANALISIS DE RESULTADOS.....	57
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	¡Error! Marcador no definido.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.0.1 Gráfico de Presión de vapor Vs Temperatura, para el agua.....	7
Fig. 2.0.2 Destilador solar de gran profundidad .....	9
Fig. 2.0.3 Destilador solar con paños .....	10
Fig. 2.0.4 Destilador esférico de barrido .....	11
Fig. 2.0.5 Destilador solar de simple efecto .....	12
Fig. 2.0.6 Esquema de un destilador solar tipo cascada .....	12
Fig. 2.0.7 Ejemplo esquemático de masas de aire.....	13
Fig. 2.0.8 Ángulo de inclinación e incidencia. ....	16
Fig. 2.0.9 Volumen de control alrededor de todo el desalinizador.....	18
Fig. 4.0.1 Balanza digital usada para medir el condensado.....	32
Fig. 4.0.2 Termocuplas ubicadas dentro de un desalinizador.....	33
Fig. 4.0.3 Comparación de los arreglos de 3 Termocuplas en los desalinizadores correspondientes.....	34
Fig. 4.0.4 Estación DAVIS Vantage Pro 2 en operación. ....	34
Fig. 4.0.5 Diagrama de flujo del ciclo básico de registro de los datos.....	36
Fig. 4.0.6 Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado al USB-TC cuando la condición de la hora exacta es falsa. ....	37
Fig. 4.0.7 Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado al USB-TC cuando la condición de la hora exacta es verdadera.....	38
Fig. 4.0.8 Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado a la tarjeta USB-12081S cuando la condición de la hora exacta es falsa.....	39
Fig. 4.0.9 Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado a la tarjeta USB-12081S cuando la condición de la hora exacta es verdadera.....	39
Fig. 4.0.10 Medidor de Radiación externo modelo Li-cor 200. ....	40
Fig. 4.0.11 Acondicionador de señal ACS2000 usado.....	41
Fig. 4.0.12 Ejemplo del diagrama de bloques de la rutina de lectura de la radiación solar cuando la condición de la hora exacta es falsa. ....	41
Fig. 4.0.13 Ejemplo del diagrama de bloques de la rutina de lectura de la radiación solar cuando la condición de la hora exacta es verdadera.....	42
Fig. 4.0.14 Tabla de datos exportada por NI LabVIEW. ....	43
Fig. 5.0.1 Desalinizadores orientados hacia el sur. ....	44
Fig. 5.0.2 Recipientes de recolección.....	45

Fig. 5.0.3 Unión entre desalinizadores. ....	46
Fig. 5.0.4 Tanque de control de nivel. ....	46
Fig. 6.0.1 Comportamiento de la eficiencia promedio de las tres series de desalinizadores.....	55
Fig. 6.0.2 Comportamiento de la producción promedio de las tres series de desalinizadores.....	55
Fig. 6.0.3 Comportamiento térmico de los desalinizadores, tomado el 24 de octubre de 2013. ....	56
Fig. 6.0.4 Dibujo en CAD del desalinizador 7. ....	57
Fig. 6.0.5 Dibujo en CAD del desalinizador 8. ....	57
Fig. 6.0.6 Dibujo en CAD del desalinizador 9. ....	58
Fig. 6.0.7 Grafico comparativo Producción Vs Profundidad .....	61

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.0.1 Numeración de los desalinizadores por ángulo de inclinación y relación de las dimensiones del vidrio. ....	22
Tabla 3.0.2 Configuración básica de los desalinizadores. ....	24
Tabla 3.0.3 Matriz de decisiones. ....	26
Tabla 6.0.1 Producción horas con sol $\text{kg}/\text{m}^2$ . ....	48
Tabla 6.0.2 Producción horas con sol en $\text{kg}/\text{m}^2$ . ....	49
Tabla 6.0.3 Producción promedio horas con sol en $\text{kg}/\text{m}^2$ . ....	49
Tabla 6.0.4 Producción horas sin sol en $\text{kg}/\text{m}^2$ . ....	50
Tabla 6.0.5 Producción horas sin sol en $\text{kg}/\text{m}^2$ . ....	50
Tabla 6.0.6 Producción promedio horas sin sol en $\text{kg}/\text{m}^2$ . ....	51
Tabla 6.0.7 Producción $\text{Kg}/\text{m}^2$ en 24 horas. ....	51
Tabla 6.0.8 Producción en $\text{Kg}/\text{m}^2$ en 24 horas. ....	52
Tabla 6.0.9 Producción promedio 24 horas $\text{kg}/\text{m}^2$ . ....	52
Tabla 6.0.10 Eficiencia diaria por desalinizador. ....	53
Tabla 6.0.11 Eficiencia diaria por desalinizador. ....	54
Tabla 6.0.12 Eficiencia promedio por desalinizador. ....	54

## INTRODUCCIÓN

A pesar de que nuestro país es rico en productos naturales y posee gran cantidad de ríos y otras fuentes de agua dulce, los servicios para abastecer de agua potable a los venezolanos dejan por momentos mucho que desear en cobertura y calidad. Las inversiones en este sector son cambiantes y dependen de las fluctuaciones en los precios del petróleo. Hay que mencionar que se encuentra en un proceso de descentralización desde 1991, pero su avance no ha sido constante gracias a falta de continuidad en este tipo de políticas. La ley orgánica de descentralización fue aprobada en el año 2003, que sólo ha sido puesta en práctica en forma parcial.

Según todas las fuentes encontradas por la ONG Fundación Azul Ambientalistas en un artículo publicado en 2012, la cobertura del Agua Potable ronda entre el 87%, según el censo del 2001, y el 92%, según HIDROVEN. Se habla de entre 2.250.000 y 3.500.000 venezolanos que no tienen acceso a este servicio.

Una opción evidente al menos para las localidades costeras es la de aprovechar el agua del mar, pero debe procesarse primero. El problema es que en algunas de estas localidades no podemos asegurar que el suministro eléctrico se mantenga más que el de agua dulce, por lo que no se puede contar con él, es entonces que se decide explorar el recurso solar.

El propósito de este trabajo es diseñar y construir una serie de desalinizadores solares de tipo gabinete a pequeña escala con ciertos parámetros geométricos variables pero sin modificar su área de colección, a fin de establecer la influencia de los parámetros de diseño geométrico mencionados sobre el desempeño del desalinizador.

El trabajo constituye la segunda etapa de un proyecto del Departamento de Energética de la Universidad Central de Venezuela enfocado en desalinización solar, tras el trabajo titulado “A Model for the Operation of a Single-Basin Solar Still” presentado ante la Sapienza, Università De Roma por la Ingeniero Rosalía Stephany Brassesco como su trabajo final de grado. El proyecto del Laboratorio utiliza los recursos del proyecto FONACIT “Modelado, diseño y construcción de un colector solar para uso agrícola”, el cual pertenece a una línea de investigación del departamento antes mencionado.

El desarrollo se inicia con establecimiento de la base teórica del proyecto, incluyendo el modelado matemático de Stephany (2012) y las variables térmicas y dinámicas que influyen en la producción de agua. A continuación se procede a la selección de parámetros de diseño y posteriormente construcción de los desalinizadores pequeños usados para el estudio.

Luego de esto, en el capítulo cuatro se detalla la manera como se instrumentó y se realizó la adquisición de los datos experimentales, seguido inmediatamente por una explicación de cómo se realizó la instalación de los equipos y como se hizo la experimentación entre los días 14 y 25 de octubre de 2013 en el capítulo 5.

En el capítulo seis se exponen y analizan los resultados obtenidos, para determinar el mejor prototipo según su producción bruta de agua y su eficiencia energética. Por último presentan nuestras conclusiones y recomendaciones que cierran el contenido del presente trabajo.

# CAPÍTULO 1

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del Problema

La costa venezolana tiene 3726 Km de longitud y en ella están grandes ciudades, puertos y grandes resorts turísticos pero también pequeñas comunidades aisladas sin un suministro de agua constante. Al mismo tiempo en los últimos años se han suscitado al menos 2 grandes emergencias en nuestra costa en las cuales importantes comunidades han quedado sin servicios básicos, citando los casos de 1999 y 2010 en los estados Vargas y Miranda. En Venezuela cualquier idea debe ser sencilla, duradera y con poca necesidad de mantenimientos profundos o repuestos, lo que limita la complejidad de la solución propuesta, es por ello que el uso de tecnologías termosolares simples surge como una solución sustentable ya que Venezuela, por estar en la zona tropical, tiene un potencial solar importante.

La búsqueda de una configuración óptima de desalinizador solar para el territorio venezolano que sea aprovechable por la población y las autoridades es el objetivo principal de este proyecto de desarrollo de tecnología termosolar, con lo cual se quiere mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas localidades.

Todos hemos sido testigos de las fallas en el suministro de energía eléctrica en los últimos años, según el diario El Impulso del 1 de enero al 18 de Junio de 2013 se registraron 534 apagones en todo el territorio nacional, el último gran apagón ocurrido el 3 de septiembre del presente año dejó a más del 70 por ciento del país sin luz, según reportes de noticias 24, más aún en momentos de emergencia que suelen repetirse con frecuencia. Es necesario hacer ensayos con el fin de optimizar los parámetros de mayor importancia para el modelo final del desalinizador, para que produzca la mayor cantidad posible de agua. Entre los factores que afectan el proceso están los rangos de

temperatura, la irradiación solar de la región, las precipitaciones, la humedad relativa de la zona, el viento y la salinidad del agua. Cabe destacar que el resultado de estos ensayos va a permitir la optimización del diseño de desalinizadores para el territorio venezolano.

## **1.2 Objetivos y Alcances**

### **1.2.1 Objetivo General**

Realizar un estudio del rendimiento de desalinizadores solares tipo gabinete (pasivo) en función de sus características geométricas a través de ensayos empíricos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar un estudio bibliográfico y de antecedentes.
2. Formular las ecuaciones de balance de masa y energía para el desalinizador.
3. Identificar los principales parámetros de diseño que influyen en el desempeño de un desalinizador solar, a través de las ecuaciones antes mencionadas.
4. Seleccionar los materiales adecuados para la construcción de los modelos de desalinizadores solares.
5. Elaborar el protocolo de ensayos para la evaluación del desempeño de los desalinizadores solares en función de los parámetros de diseño identificados.
6. Construcción de los prototipos de desalinizador.
7. Diseño y Construcción del sistema de control de nivel para los desalinizadores.
8. Evaluación empírica del desempeño de los prototipos.
9. Análisis de los resultados obtenidos.
10. Redacción del informe final.

## **1.3 Alcances y Limitaciones**

### **1.3.1 Alcances**

Se evaluó de forma empírica el cambio en el desempeño del desalinizador al variar características geométricas, quedando siempre como parámetro fijo el área total de absorción de radiación solar.

### **1.3.2 Limitaciones**

Los experimentos en condiciones reales estuvieron limitados a las características meteorológicas del valle de Caracas.

## **CAPITULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Desalinización**

Kalogirou (2005) expresa que el termino desalinización en general se refiere a separar sal de agua de mar o de cualquier otro cuerpo de agua que contenga sales disueltas. Según la organización mundial de la salud (OMS) el limite permisible de salinidad en el agua es quinientas p.p.m. o en ciertos casos especiales hasta mil p.p.m., mientras que el agua disponible sobre la tierra tiene una salinidad de hasta diez mil (10.000) p.p.m. y el agua de mar posee una salinidad de entre treinta y cinco mil (35.000) y cuarenta y cinco mil (45.000) p.p.m. en forma de sales totales disueltas.

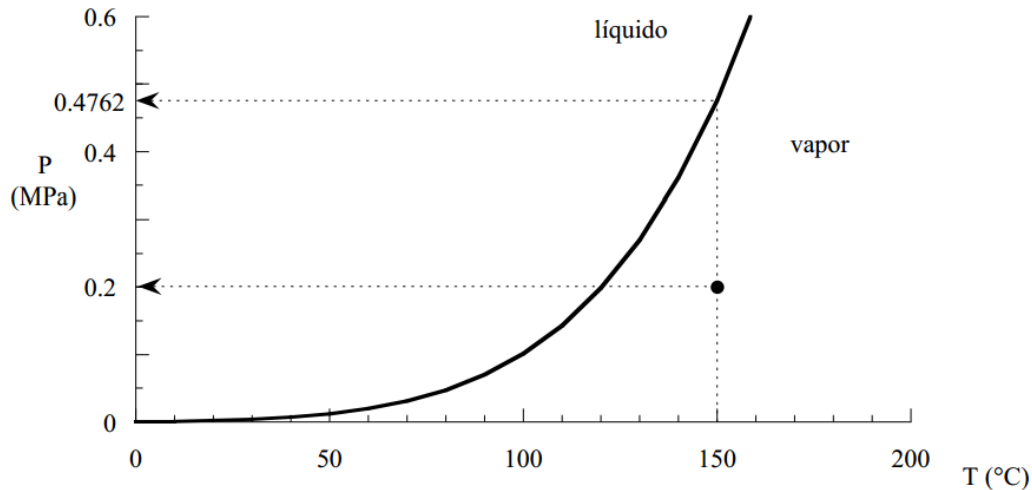
Más adelante en el mismo artículo dice que la energía solar se puede utilizar en el proceso de desalinización de agua para suministrar la energía térmica requerida para inducir el cambio de fase o para producir la electricidad requerida para impulsar el agua a través de las membranas de filtración.

#### **2.2 Presión de vapor**

Si un líquido está contenido en un recipiente cerrado, inicialmente sólo se produce la evaporación, ya que no hay vapor; sin embargo, a medida que la cantidad de vapor aumenta y por tanto la presión, en el interior del recipiente se va incrementando también la velocidad de condensación, hasta que, transcurrido un cierto tiempo, ambas velocidades se igualan, en este punto se establece el equilibrio dinámico. Decimos entonces, que tenemos vapor saturado a la temperatura  $T$  y la presión parcial que ejerce el vapor a esta temperatura se denomina presión de vapor  $P_v$ .

##### **2.2.1 Influencia de la temperatura**

La presión de vapor de un líquido, es constante a una temperatura dada, pero aumenta si lo hace la temperatura. La explicación de este fenómeno se basa en que cuando un líquido se calienta, estamos suministrándole energía, esta energía se traduce en mayor velocidad de vaporización y por lo tanto habrá un aumento de la presión de vapor como se observa en la figura 2.1.



**Fig. 2.0.1 Gráfico de Presión de vapor Vs Temperatura, para el agua. (Fuente: Erich A. Müller (2002), Termodinámica Básica, Caracas, Venezuela (P.69)).**

### 2.2.2 Influencia de la naturaleza del líquido

El valor de la presión de vapor saturado de un líquido, da una idea clara de su volatilidad, los líquidos más volátiles (éter, gasolina, acetona, entre otros) tienen una presión de vapor saturado más alta, por lo que este tipo de líquidos, confinados en un recipiente cerrado, mantendrán a la misma temperatura, una presión mayor que otros menos volátiles.

### 2.2.3 Influencia del soluto

La ley de Raoult nos dice que la presión de vapor parcial de cada componente de una solución ( $P_1$ ) está dada por la presión de vapor del componente puro a esas condiciones ( $P^{\circ}_1$ ), multiplicada por la fracción molar del componente en la disolución  $X_1$ , y que la presión total será la suma de las presiones parciales.

$$P_{solucion} = \sum_i^n P_i X_i$$

### **Ecuación 2.0.1**

Es decir que la presión de vapor del soluto crece linealmente con su fracción molar. En una solución que sólo contenga un soluto, se tiene que  $X_1 = 1 - X_2$ , donde  $X_2$  es la fracción molar del soluto, pudiendo escribir la formulación de la ley como:

$$P_1 = (1 - X_2)P_1^0$$

### **Ecuación 2.0.2**

$$P_1^0 - P_1 = \Delta P = X_2 P_1^0$$

### **Ecuación 2.0.3**

Es decir que  $\Delta P$ , que puede verse como una caída en la presión de saturación es directamente proporcional a la concentración del soluto presente, en su fracción molar.

## **2.3 Destilación**

Es el proceso que consiste en calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y a continuación enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación. El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles.

## **2.4 Destiladores solares**

### **2.4.1 Clasificación de los sistemas de destilación solar**

Los sistemas de desalinización solar se clasifican en dos categorías:

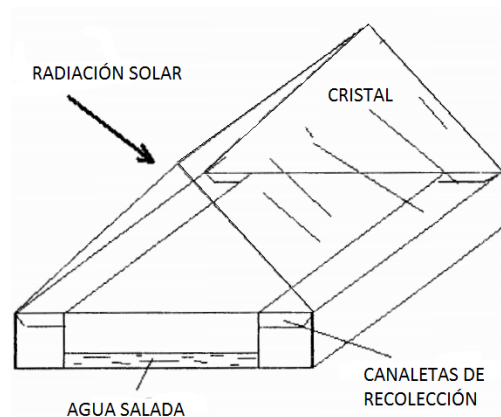
Directas: Es cuando se usa energía solar para producir la destilación en el mismo colector.

Indirectas: Cuando se utilizan dos subsistemas, uno donde se colecta la energía solar y uno donde se desaliniza el agua.

Patiño (1989) los clasifica de la siguiente forma:

1- Destilador solar de gran profundidad: Estos destiladores se colocan directamente sobre el suelo arenoso sin aislamiento interpuesto. El terreno seco es mal conductor del calor, y la superficie del destilador permite únicamente una pérdida relativamente pequeña de calor por los bordes.

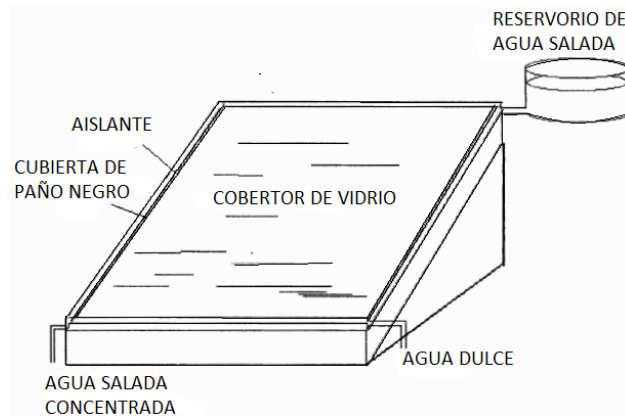
Los 30 cm de agua y el terreno seco debajo, mantienen el calor durante la noche. La destilación continuará a un ritmo constante durante las 24 horas del día.



**Fig. 2.0.2 Destilador solar de gran profundidad (fuente: Maldonado, E.A (2002), Estudio de la factibilidad de la implementación de un Destilador Solar como abastecedor de agua de bebida a partir de agua de mar para la Base Naval de Baltra, Galápagos (p.45)).**

2- Destilador solar con paños: Son fabricados de madera, sostenidos con estructura de hierro y formando un ángulo mayor de  $10^{\circ}\text{C}$  con la horizontal, con el fondo aislante se coloca una hoja de plástico impermeable sobre el que se coloca un paño negro y sobre él una cubierta de plástico o vidrio. El agua fluye lentamente desde la parte superior del paño y parte de ella se evapora y condensa en el interior de la cubierta

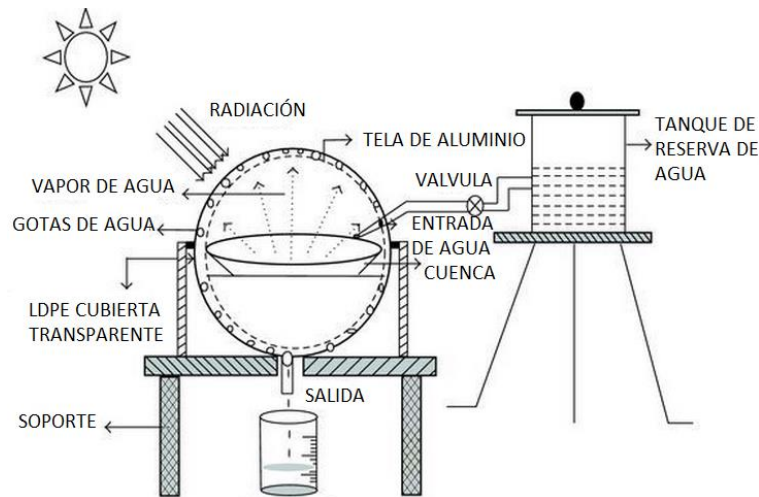
El resto baja hacia la parte inferior en donde se concentra hasta que deposita las sales, reflectantes y de color blanco.



**Fig. 2.0.3 Destilador solar con paños (fuente: Maldonado, E.A (2002), Estudio de la factibilidad de la implementación de un Destilador Solar como abastecedor de agua de bebida a partir de agua de mar para la Base Naval de Baltra, Galápagos (p.46)).**

3- Destilador esférico de barrido: El destilador esférico de barrido está formado por una semiesfera de plexiglass y otro material plástico transparente que descansa sobre unos soportes como se ve en la figura 2.0.4. .

En su parte media está situada la cubeta, aislada por su parte inferior donde contiene el agua a destilar; Esta cubeta descansa sobre tres apoyos de materia plástica situadas en la esfera, dispone de un sistema mecánico de recuperación del agua destilada por medio de un limpia parabrisas movido por un motor eléctrico. La condensación se efectúa sobre la semiesfera superior y el condensado se recoge en la base de la semiesfera inferior.

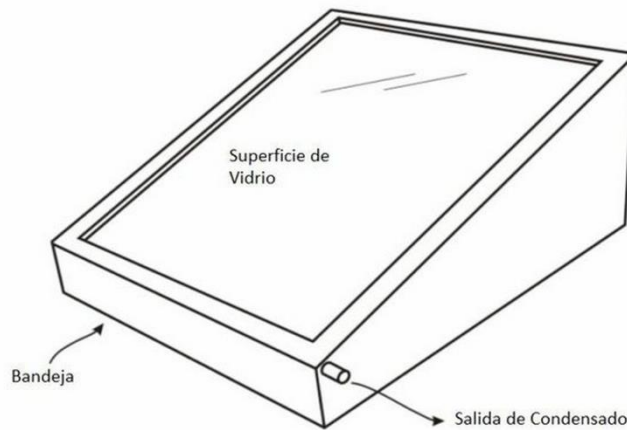


**Fig. 2.0.4 Destilador esférico de barrido (fuente: adaptado de T. Arunkumar, K.Vinothkumar, Amimul Ahsan, R. Jayaprakash, y Sanjay Kumar (2012) Experimental Study on Various Solar Still Designs (p.2)).**

4- Destilador solar de simple efecto: Consiste en un recipiente en que el agua mantiene poca profundidad y se evapora por la acción del calor solar que incide sobre ella. El recipiente se encuentra dotado de una cubierta de vidrio o plástico, transparente que permite el paso de la energía solar y a su vez provee una superficie en su cara interior donde es condensado el vapor de agua (Fig 2.0.5).

El principio es sencillo, el agua que se encuentra en la bandeja experimenta una elevación de temperatura debido a la incidencia de la radiación solar sobre ésta, el aire en el interior empieza a humedecerse hasta que alcanza su punto de saturación, de tal forma que el espacio entre la cubierta de vidrio y la superficie del agua es llenado por una mezcla de vapor de agua y aire, el vapor de agua se condensa en la cara interior del techo y corre hacia los canalones que conducen el agua destilada a un recipiente apropiado.

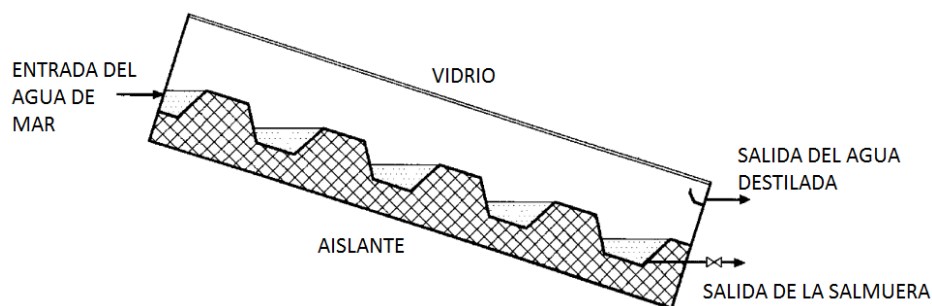
La cubierta de vidrio funciona como una trampa para el calor, es transparente a la luz solar incidente pero opaco a la radiación infrarroja emitida por el agua caliente.



**Fig. 2.0.5 Destilador solar de simple efecto (fuente: adaptado Stephany, R. (2012). A Model for Operation of a Single-Basin Solar Still (p.2)).**

5- Destilador solar en cascada: Es un destilador solar inclinado de dos caras, con pequeños escalones que retienen el agua a diferentes niveles lo cual permite reducir la profundidad media del agua como se ve en la figura 2.0.6.

El sistema tipo cascada surgió como solución al problema de que mientras más lejos se encontraba el agua de la superficie condensadora menos eficiente se hacía el proceso.



**Fig. 2.0.6 Esquema de un destilador solar tipo cascada (fuente: Adaptado de A. Kalogirou (2005), Progress in Energy and Combustion Science (p.254)).**

Una pequeña masa de agua se calienta más rápido que una gran masa de agua sometida a las mismas condiciones. Como la temperatura de la capa superficial del agua determina la presión del vapor de agua, su temperatura debe ser tan alta como sea

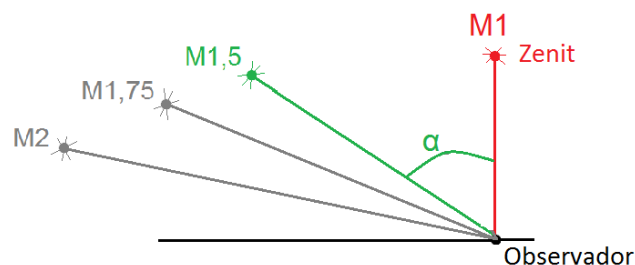
posible, estas características son consecuencia de la distancia corta entre la cubierta de vidrio y la capa de agua contaminada o turbia.

Otros investigadores han utilizado técnicas diferentes para mejorar el rendimiento de los desalinizadores. Rajvanshi (1981) utilizó colorante para mejorar el rendimiento. Estos colorantes oscurecen el agua y aumenta su absortividad ante la radiación solar. Usando naftilamina negra con una concentración de 172.5 p.p.m. la producción de agua del desalinizador se pudo mejorar un 29%, el uso de estos colorantes es seguro porque la evaporación en el desalinizador ocurre a 60°C mientras que el punto de ebullición del colorante es 180 °C. Akinsete y Duru (1979) esparcieron una capa de carbón en el fondo que logro disminuir el tiempo de calentamiento del sistema. Lobo y Araujo (1978) desarrollaron un sistema doble con el primero transparente y ubicado encima del segundo, logrando incrementar entre 40% y 55% la salida.

En el caso del presente trabajo se estudian múltiples variaciones geométricas de desalinizadores simples, pasivos de un solo plano inclinado y sin ninguna otra modificación para mejorar su rendimiento.

## 2.5 Masa de Aire

Es un término que define indirectamente a la distancia entre la altura del sol respecto al horizonte y un observador fijo sobre la tierra que es mínima en el zénit solar ya que los rayos caen formando un ángulo de 90° respecto al horizonte. Cuando el sol está más cercano al horizonte, la masa de aire “M” crece y con ella la distancia que deben atravesar los rayos para alcanzar la posición del observador (Fig. 2.7).



**Fig. 2.0.7 Ejemplo esquemático de masas de aire.**

Para cualquier posición del observador y momento, la masa de aire se define como:

$$Masa\ de\ Aire = \frac{1}{\cos(\alpha)}$$

#### **Ecuación 2.0.4**

Donde  $\alpha$  es el ángulo formado entre la posición del zénit y la posición del sol en el momento de la observación, por lo que en el caso del zénit el valor de la masa de aire será igual a 1.

### **2.6 Irradiación**

En su material de clase Mateo (2012) define la irradiación solar como el valor de la potencia luminosa (Energía/Unidad de tiempo) que recibe una superficie de un metro cuadrado en un determinado instante. Cuando la masa de aire es de 1,5 la potencia de la radiación solar es de  $1\text{KW/m}^2$ . Este valor es conocido con el nombre de “Sol”.

### **2.7 Insolación**

Definido por el Ing. Mateo, A (2012) como la cantidad de energía solar (directa y reflejada) que se recibe durante la duración del día en un determinado punto del planeta por metro cuadrado horizontal.

Se puede ver como la integración temporal de la curva de irradiación, por lo que expresa en  $\text{KWh/m}^2$ .

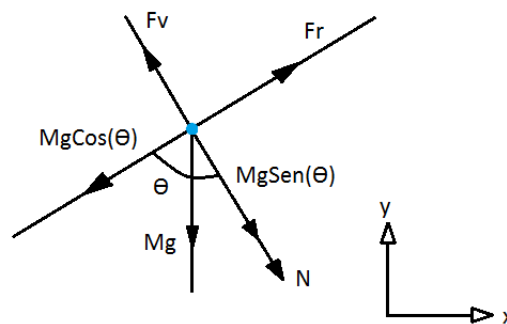
### **2.8 Día solar**

Según el Mateo (2012) es el valor promedio de horas con que recibiendo una radiación de un “Sol” se obtiene la misma energía que la recibida en la realidad entre al amanecer y el anochecer solar en un lugar determinado.

Según las convenciones de la organización meteorológica mundial (2003), el umbral de irradiación para definir el amanecer y anochecer es  $120\text{ W/m}^2$ .

## 2.9 Análisis dinámico

Como se observa en el diagrama de cuerpo libre sobre una partícula de agua en el vidrio (Fig. 2.8) para que esta deslice hacia el canal de colección es necesario que la componente del peso a lo largo del vidrio logre vencer a la fuerza de roce que existe entre el vidrio y el agua. Ya que la aceleración de gravedad es constante esto dependerá de dos variables, la masa representada en la partícula y el ángulo de inclinación del vidrio.

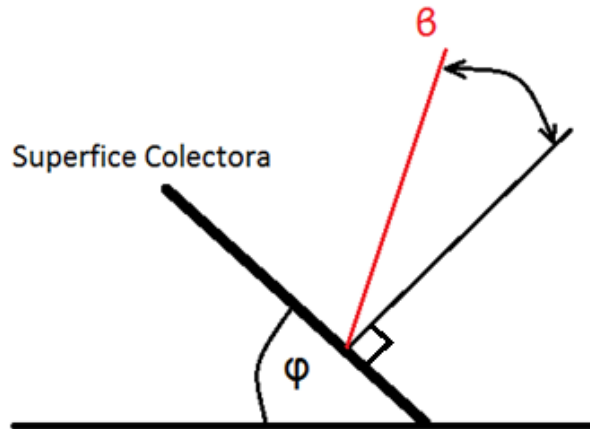


**Fig. 2.8 Diagrama de cuerpo libre de una partícula de agua condensada en el vidrio.**

La masa de esta partícula irá aumentando con la condensación hasta un punto crítico donde se pueden dar dos casos: que la partícula escurra si vence primero la fuerza de roce o que precipite de vuelta a la bandeja de agua. Se quiere que ocurra el primer caso pero no podemos colocar una superficie muy vertical pues también se debe tomar en cuenta el ángulo de incidencia de los rayos solares.

## 2.10 Ángulo de inclinación e incidencia

Duffie (1991) establece que el ángulo de inclinación  $\phi$  es el formado entre la superficie colectora y la horizontal del lugar (fig.2.9) para un dado valor del ángulo de inclinación, dependiendo de la posición del sol sobre el horizonte existirá un valor para el ángulo de incidencia  $\delta$  que forma la perpendicular a la superficie de colección con los rayos incidentes.



**Fig. 2.0.8 Ángulo de inclinación e incidencia.**

En colectores fijos es imposible mantener el ángulo  $\delta$  en cero para obtener un valor máximo de energía absorbida en todo momento, por lo que en diversas fuentes, incluyendo a Duffie (1991) y a Mateo (2012) recomiendan dar al ángulo de inclinación un valor igual al de la latitud del lugar más  $15^\circ$  hacia el sur (posición favorable para el invierno) y aceptar una pequeña pérdida energética durante el verano.

### **2.11 Latitud**

Es el ángulo norte-sur sobre la superficie terrestre medido desde el ecuador es positivo hacia el norte y negativo hacia el sur.

### **2.12 Declinación**

Según Duffie (1991) Es la posición angular del sol en el sitio a estudiar en el medio día solar respecto al plano del ecuador con positivo hacia el norte.

### **2.13 Ángulo acimutal de la superficie**

Según Duffie (1991) Es el ángulo que forma la proyección de la normal de la superficie estudiada sobre una superficie horizontal con la dirección sur; por convención los ángulos hacia el este son negativos y hacia el oeste son positivos.

## **2.14 Ángulo horario**

En su libro, Duffie (1991) lo define como la variación del ángulo de incidencia del sol producto de la rotación terrestre, dicho ángulo varia  $15^\circ$  por hora y se toma negativo hacia el este y positivo hacia el oeste (tomando como cero el zénit).

## **2.15 Ángulo cenital y altitud solar**

El ángulo Cenital es el ángulo que forma la línea hacia el sol desde un punto con la vertical y la altitud solar es el ángulo entre la línea del sol desde un punto con la horizontal, es decir, son ángulos complementarios.

## **2.16 Ángulo acimutal solar**

Es el desplazamiento angular respecto de la dirección sur de la proyección de la dirección de los rayos solares sobre el plano horizontal.

## **2.18 Modelo termodinámico**

En el año 2012, Rosalía Stephany desarrolló un modelo termodinámico para la operación de los desalinizadores simples tipo gabinete, parte del mismo proyecto general del cual forma parte el presente trabajo.

El rendimiento de un desalinizador solar tipo gabinete se puede medir por el volumen de agua condensada por unidad área de recolección en un tiempo determinado, variable que quiere maximizarse en todos los casos.

Cabe destacar que el modelado es para estado permanente.

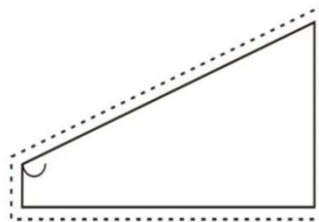
Para modelar el fenómeno Stephany realizó dos balances de energía, uno usando un volumen de control alrededor del desalinizador completo (Fig. 2.10) y uno para el contenido del desalinizador (Fig. 2.11).

Para el modelado se hicieron ciertas suposiciones:

- Se asumió flujo laminar en la película de condensado.
- Se despreció el esfuerzo cortante en la interfaz liquido-vapor.
- La transferencia de calor a lo largo de la película de condensado se asumió como si fuese conducción.
- Se asumió que las paredes del desalinizador no transfieren calor.

El último punto se puede considerar real en nuestro caso ya que se usaron aislantes de poliuretano comprimido en las paredes de los dispositivos.

Para el volumen de control alrededor del desalinizador completo se puede expresar el balance de energía como:



**Fig. 2.0.9 Volumen de control alrededor de todo el desalinizador (fuente Stephany, R. (2012). A Model for Operation of a Single-Basin Solar Still (p.2)).**

$$GA_g = G\rho_g + q_h A_g + q_{rad,g} A_g + \dot{m}_c i_{sat,f}(T_g)$$

**Ecuación 6.0.5**

Donde G es la irradiación solar,  $A_g$  es el área del vidrio,  $\rho_g$  es la reflectividad del vidrio,  $q_h$  es el calor que se convecta del vidrio al ambiente,  $q_{rad,g}$  es el calor que se irradia del vidrio al ambiente,  $\dot{m}_c$  es la rata de flujo de masa del agua condensada e  $i_{sat,f}$  es la entalpía específica del líquido saturado a la temperatura del vidrio.

Es decir que en régimen permanente, la totalidad del calor que es irradiado sobre el vidrio por el sol es reflejado, convectado a la atmosfera, irradiado a la atmosfera o ingresa al desalinizador de donde sale en forma del flujo de agua que se condensa.

El coeficiente convectivo vidrio-ambiente es calculado por la relación de McAdams (1954) y la radiación vidrio-ambiente es calculada por la ley de Stephan-Boltzman, pero el término de la masa se puede expresar en función del calor latente de vaporización del

agua a la temperatura del vidrio y el coeficiente convectivo promedio entre la película y el vidrio:

$$\dot{m}_c = \frac{\bar{h}_L A_g (T - T_g)}{i_{fg}'}$$

**Ecuación 6.0.6**

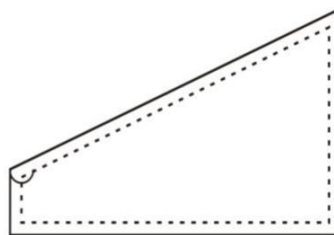
Donde  $i_{fg}'$  es una modificación de la entalpía de vaporización propuesta por Rohsenow (1962) para casos donde la superficie de un fluido está por encima de la temperatura de saturación pero el flujo de calor es relativamente pequeño. El coeficiente convectivo promedio equivale a la expresión:

$$\bar{h}_L = 0,943 \left[ \frac{\rho_l g \cos(\theta) (\rho_l - \rho_v) i_{fg}' k_l^3}{\mu_l (T - T_g) L} \right]^{1/4}$$

**Ecuación 6.0.7**

Donde los  $\rho$  corresponden a las densidades del líquido y vapor,  $k_l$  es la conductividad térmica del líquido y  $\mu_l$  es su viscosidad dinámica, pero donde también aparecen variables geométricas del desalinizador como L (longitud del vidrio) y  $\Theta$  que es el ángulo superior interno del desalinizador.

Por otra parte el balance de energía del contenido del desalinizador resulta:



**Fig. 2.11 Volumen de control del contenido del desalinizador solar (fuente Stephany, R. (2012). *A Model for Operation of a Single-Basin Solar Still* (p.4)).**

$$G\tau_g = \dot{m}_c i_{sat,g}(T) + A_b q_{rad,l}$$

**Ecuación 6.0.8**

Con la entalpía de saturación del vapor y donde  $A_b$  es el área de la base (que depende de  $\Theta$ ) y  $q_{rad,l}$  es el calor irradiado del agua hacia el vidrio, que depende del factor de vista (es decir del ángulo y de la altura).

El sistema de ecuaciones resultante de los balances de energía requirió ser resuelto por métodos numéricos, ya que depende de temperaturas y funciones no-lineales. Es parte de esos resultados que se quieren cotejar experimentalmente en el presente trabajo.

## CAPITULO 3

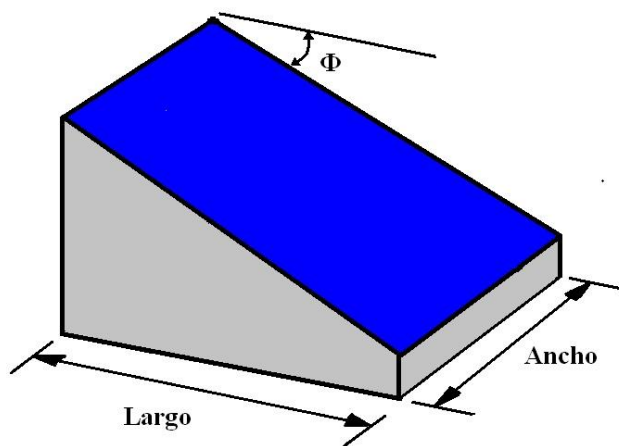
### DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL BANCO DE PRUEBAS

#### 3.1 Diseño del banco de prueba

##### 3.1.1 Características generales

Como se observó en el trabajo de Stephany (2012) la eficiencia de los desalinizadores depende de las características geométricas de dicho dispositivo, variables como el ángulo de inclinación de la superficie colectora (vidrio), el área de colección, las dimensiones de las paredes, entre otros, afectan el rendimiento del sistema.

En la búsqueda de la configuración óptima se construyó un banco de pruebas que consiste en 9 desalinizadores, todos fueron pintados de color negro para aumentar la capacidad de absorción de energía solar. Cada desalinizador posee características geométricas particulares (Fig. 3.0.1), se mantuvo constante el área de colección solar de  $0.25 \text{ m}^2$  y la altura de la pared frontal "A" (Fig. 3.2) de cada desalinizador (pared donde el vidrio alcanza su punto más bajo) que mide 12,5 cm. Se varió el ángulo de inclinación de la superficie colectora entre los valores  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$  y la relación ancho entre largo del vidrio entre los valores 0.67, 1, 1.5. Por combinaciones de estas variables se obtuvieron las siguientes configuraciones y medidas Tabla 3.1:

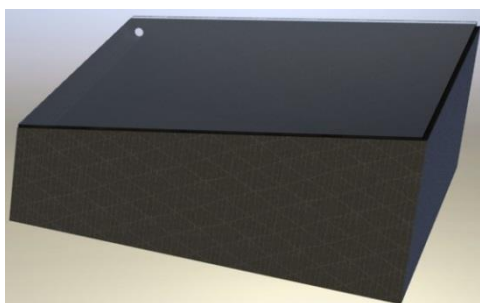


**Fig. 3.0.1 Características geométricas de los desalinizadores**

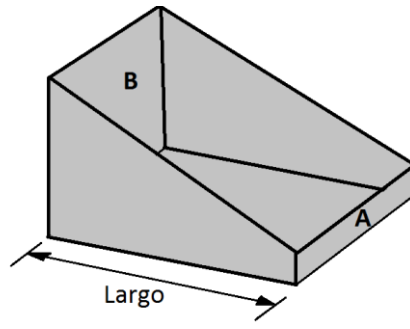
SUPERFICIE COLECTORA	ANGULO		
	10°	20°	30°
RL			
2/3	7	8	9
3/2	4	5	6
1	1	2	3

**Tabla 3.0.1 Numeración de los desalinizadores por ángulo de inclinación y relación de las dimensiones del vidrio.**

Se realizó un modelo en CAD (Fig. 3.0.2) de cada desalinizador para visualizar las proporciones finales a escala.



**Fig. 3.0.2 Modelo digital de un desalinizador a escala.**



**Fig. 3.0.3 Desalinizador solar paredes A y B.**

DESALINIZADOR	ANGULO	Altura pared A (cm)	Ancho pared A (cm)	Altura pared B (cm)	LARGO
1	10°	12,5	50	21,2	49,2
2	20°	12,5	50	29,6	46,9
3	30°	12,5	50	37,5	43,3
4	10°	12,5	41	23,1	60
5	20°	12,5	41	33,4	57,3
6	30°	12,5	41	43	52,8
7	10°	12,5	61	19,6	40,4
8	20°	12,5	61	26,5	38,5
9	30°	12,5	61	33	35,5

**Tabla 3.0.2 Configuración básica de los desalinizadores.**

### **3.2 Materiales utilizados**

Para la selección del material se tomó en cuenta lo siguiente:

1. Se debió evitar que éste contamine el condensado, ya que el material de construcción se encuentra en contacto directo con el agua.
2. Se seleccionaron materiales resistentes al calor, humedad, golpes, corrosión, entre otros.
3. Debía haber disponibilidad en el mercado nacional.
4. Se tomaron en cuenta el costo de adquisición del material y transporte.
5. Se tomó en cuenta dificultad de fabricación, en este punto se evaluaron aspectos como facilidad de corte, moldeado, acabado, permeabilidad, entre otros.

Los materiales propuestos fueron la madera, el acero inoxidable y la fibra de vidrio.

Para realizar la evaluación de cada propuesta se toma en cuenta la siguiente escala de puntuación:

- Muy malo: 1
- Malo: 2
- Bueno: 3
- Muy Bueno: 4
- Excelente: 5

Luego, para obtener el valor final, se multiplica la puntuación anterior de cada solución por el asignado en porcentaje y se suman todos los resultados para así obtener el total y comparar entre los tres materiales.

La matriz de decisiones mostrada en la tabla 3.3 otorga el mayor porcentaje de puntuación a los criterios de disponibilidad en el mercado y dificultad de manufacturación del material, se le asignó un porcentaje menor a la resistencia del material y a la capacidad de este de contaminar el agua, por último se le dio menos importancia al costo ya que contábamos con el presupuesto otorgado por FONACIT.

Evaluación del material	%	Madera	Acero Inoxidable	Fibra de Vidrio
Criterio 1	18	5	5	5
Criterio 2	18	3	5	5
Criterio 3	24	4	2	4
Criterio 4	16	4	2	4
Criterio 5	24	3	3	4
Total	100	3,76	3,32	4,36

**Tabla 3.0.3 Matriz de decisiones.**

Se observa en la tabla 3.3 que el material que tuvo mejor puntuación fue la fibra de vidrio y es por ello que se procedió a su utilización.

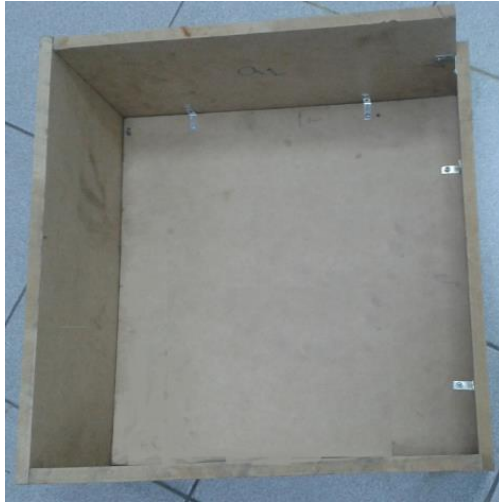
Como superficie colectora se tenían 2 propuestas: el vidrio y láminas de acrílico. Como en el mercado local el segundo era mucho más costoso que el primero se seleccionó el vidrio.

### **3.3 Construcción**

#### **3.3.1 El Casco**

El Proceso de Construcción fue el siguiente:

- 1.-Se fabricaron moldes de madera (Fig. 3.0.4).



**Fig. 3.0.4 Molde de madera.**

2.-Se sellaron las juntas con pasta de yeso (Fig. 3.0.5).



**Fig. 3.0.5 Moldes con juntas selladas.**

3.-Se aplicó cera a los moldes para facilitar el proceso de desmoldado (Fig. 3.0.6).

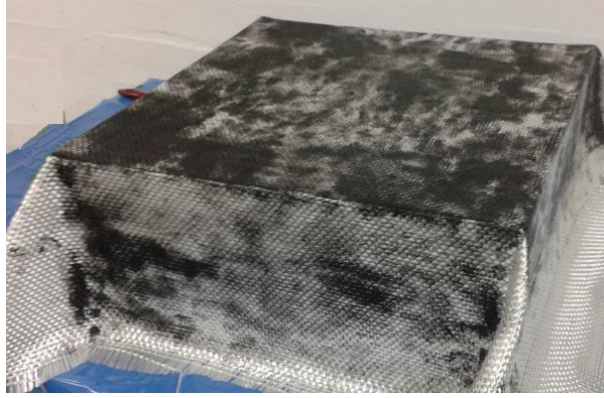


**Fig. 3.0.6 Molde de madera con una capa de cera negra.**

4.- Se aplicó una capa de fibra de vidrio MAT de 458 grs/m<sup>2</sup> (Fig 3.0.7) con resina de poliéster catalizada con Peróxido de Metil Etil Cetona alrededor de cada molde y posteriormente se aplicó otra capa de Woven Roving (610gr/m<sup>2</sup>) (Fig 3.0.8) igualmente con resina de poliéster y catalizado con Peroxido de Metil Etil Cetona para proporcionar una mayor rigidez.



**Fig. 3.0.7 Capa de MAT 458 grs/m<sup>2</sup>.**



**Fig. 3.0.8 Capa de Woven Roving (610gr/m<sup>2</sup>).**

5.- Se procedió al desmoldado (Fig. 3.0.9) y se cortaron los excesos de fibra obteniendo la forma final del desalinizador.



**Fig. 3.0.9 Desalinizador después del desmoldado.**

6.- En las esquinas de las paredes se aplicó una mezcla de Talco Industrial malla 325 y resina de poliéster catalizada con Peróxido de Metil Etil Cetona para sellar cualquier grieta que pudiere haber en esa zona (Fig. 3.0.10).



**Fig. 3.0.10 Esquinas selladas con Talco Industrial malla 325.**

7.- Posteriormente se aplicó una última capa de MAT 458 grs/m<sup>2</sup> con resina de poliéster catalizado en la parte interna del desalinizador, esta última ayuda a asegurar la permeabilidad del mismo y al ser aplicada con gelcoat Ortoftálico negro (catalizado) se logró el color final del dispositivo.

### **3.3.2 El canal de recolección**

El canal de recolección de agua se fabricó con una tubería de PVC translúcido y se fijó a la pared frontal del desalinizador con sellador de silicón translúcido. En la salida del canal se colocó un niple de ½ pulgada a 10 cm de la base del desalinizador, este niple es el que atraviesa la pared del dispositivo y sirve de unión entre el canal y la manguera que lleva el agua a los recipientes de colección (Fig. 3.0.11).



**Fig. 3.0.11 Canal de Recolección de agua.**

### 3.3.3 El Sello de Goma

Para evitar fugas alrededor de la superficie de colección se usaron gomas cuyo perfil encaja en la pared del desalinizador y se fijaron a la superficie del vidrio con silicón traslucido, además esto permite que la superficie colectora sea retirada fácilmente para el mantenimiento del desalinizador (Fig 3.0.12).



**Fig. 3.0.12 Sello de goma del vidrio.**

### 3.3.4 El Aislante

Se colocaron láminas de poliuretano comprimido de 2 cm de espesor del tipo usado como aislantes de ductos de aire acondicionado en cada pared con el fin de reducir las pérdidas de calor al ambiente, dichos aislantes se fijaron a las paredes con la ayuda de cinta adhesiva industrial y se protegieron de la humedad colocando cinta adhesiva transparente en la zona permeable de los mismos (Fig. 3.0.13).



**Fig. 3.0.13 Aislantes de poliuretano.**

## CAPITULO 4

### INSTRUMENTACIÓN

Se registró la producción diaria de agua utilizando una balanza digital 9010A (Fig 4.0.1) para medir la masa del recipiente con agua para posteriormente restar el peso del recipiente, medido aparte.



**Fig. 4.0.1 Balanza digital usada para medir el condensado.**

Se colocaron prensa estopas con el fin de realizar tomas de temperatura usando termocuplas tipo K en todos los desalinizadores: Cada desalinizador permite colocar una termocupla lo más cerca posible a la interfaz agua-aire más dos adicionales (Fig 4.0.2) en los números 4, 5 y 6 (aquellos donde el largo del vidrio es 1,5 veces su ancho). Las prensas estopas están colocadas en la pared del desalinizador, todas las prensas estopas se colocaron en la misma pared del desalinizador donde se colocó la salida de condensado, alineadas en el centro de la siguiente forma:

- Prensa estopa de interfaz: ubicada a 8,5 cm del fondo del desalinizador.
- Prensa estopa del agua (donde aplica): a 2,5 cm del fondo del desalinizador.

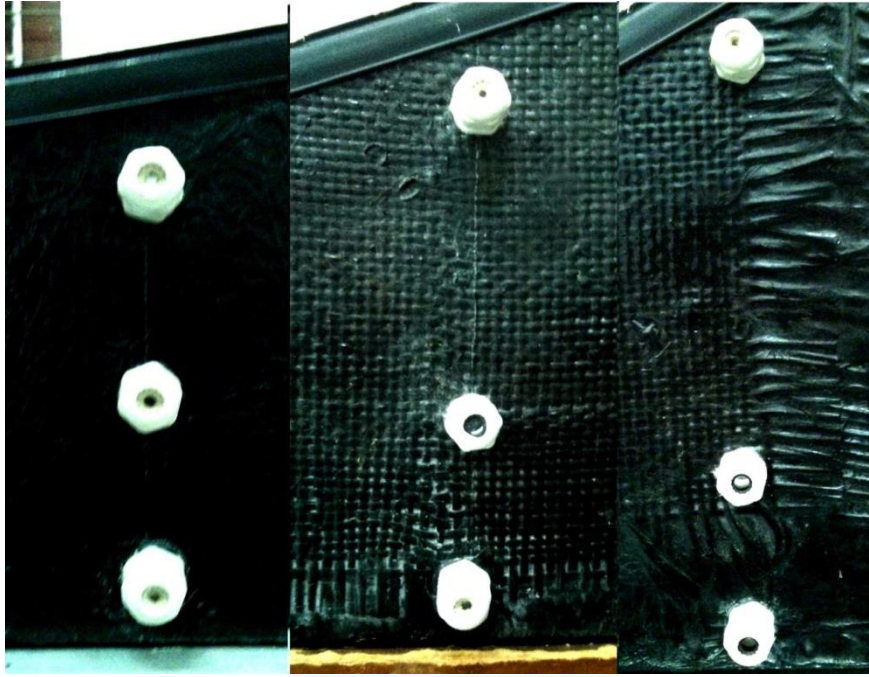
- Prensa estopa del vidrio (donde aplica): a 4 cm del borde del desalinizador.

El motivo de que se colocaron tres tomas de temperatura sólo en los mencionados tres desalinizadores es no se cuenta con capacidad para leer tantas termocuplas a la vez, por lo que se eligieron unos pocos. Se deseaba que los desalinizadores a elegir tuviesen una característica geométrica en común para poder comparar los resultados. Se eligió entonces el 4, 5 y 6 que por sus características geométricas son donde la variación de la distancia entre las tres termocuplas es máxima (Fig. 4.0.3).



**Fig. 4.0.2 Termocuplas ubicadas dentro de un desalinizador.**

La producción de agua y los datos de temperatura se compararon durante el experimento con la radiación solar, mientras que se monitorearon datos meteorológicos como la velocidad del viento, humedad relativa, presión y radiación UV. Todo usando la estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 disponible para el proyecto (Fig. 4.0.4).



**Fig. 4.0.3 Comparación de los arreglos de 3 Termocuplas en los desalinizadores correspondientes.**



**Fig. 4.0.4 Estación DAVIS Vantage Pro 2 en operación.**

Las termocuplas se leyeron usando una tarjeta USB-TC (especial para termocuplas) de measurement computing con capacidad de leer hasta 8 entradas analógicas. Para otras tomas de datos se contó también con una tarjeta modelo USB-12081S también de measurement computing, que reporta hasta 10 entradas analógicas en milivoltios.

Se programó un Instrumento Virtual (o “VI”) utilizando NI Lab View 2011 que cumpliera con el objetivo de tomar medidas automática y simultáneamente de todos los instrumentos, a saber:

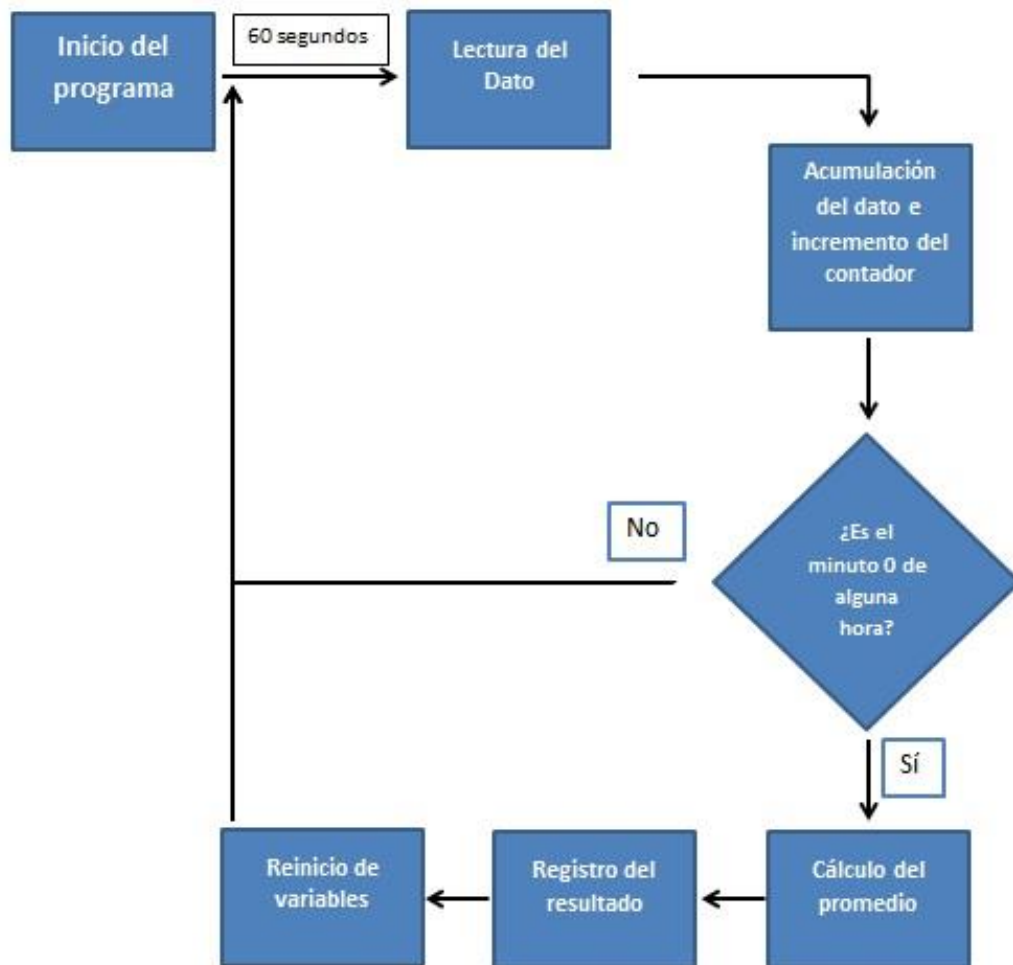
- 8 Termocuplas a través de la tarjeta USB-TC.
- Hasta 10 instrumentos adicionales a través de la tarjeta USB-12081S.
- Instrumentos a través de la Estación DAVIS Vantage Pro 2.

NI LabVIEW permite automatizar procesos y experimentos usando una computadora personal y tarjetas externas, se programa utilizando un lenguaje de bloques propio. La mayoría de los fabricantes de tarjetas externas proveen sub rutinas pre-programadas que facilitan el uso de sus productos, en forma de bloques del lenguaje.

Para el registro de datos se eligió realizar promedios cada hora ya que el valor resultante es más representativo del comportamiento de la variable durante un período de tiempo que sólo tomar una medida al principio o al final de dicho período.

Se usó un período de 60000 milisegundos (Un minuto) para la ejecución de un ciclo que acumula datos y un condicional que calcula el promedio cada hora y guarda el resultado en un archivo de texto. Se usó un contador del número de medidas para aceptar que se tomen medidas en horas incompletas.

El diagrama de flujo del programa básico se esquematiza en la (Fig. 4.0.5).



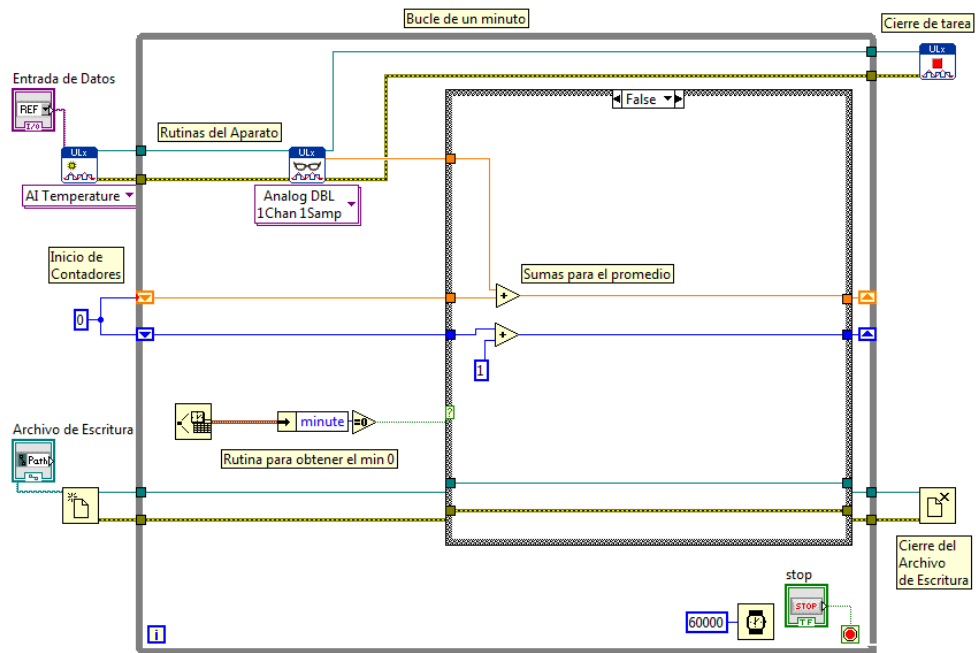
**Fig. 4.0.5 Diagrama de flujo del ciclo básico de registro de los datos.**

Debido a la forma como se manejan entradas de datos en NI LabVIEW, la porción de registro de datos del Instrumento virtual corre como varios ciclos como el descrito anteriormente en paralelo, ligeramente diferentes según la tarjeta de adquisición de datos que usa cada bucle.

En el caso de la Tarjeta USB-TC, Measurement Computing provee una librería de subrutinas llamada ULx for LabVIEW que automáticamente conecta la computadora con la tarjeta USB-TC previamente configurada en un programa aparte, llamado InstaCal. El USB-TC directamente envía a LabVIEW el dato de Temperatura a través de un “canal virtual”, que se crea con un bloque, al cual se le especifica que puerto está siendo usado.

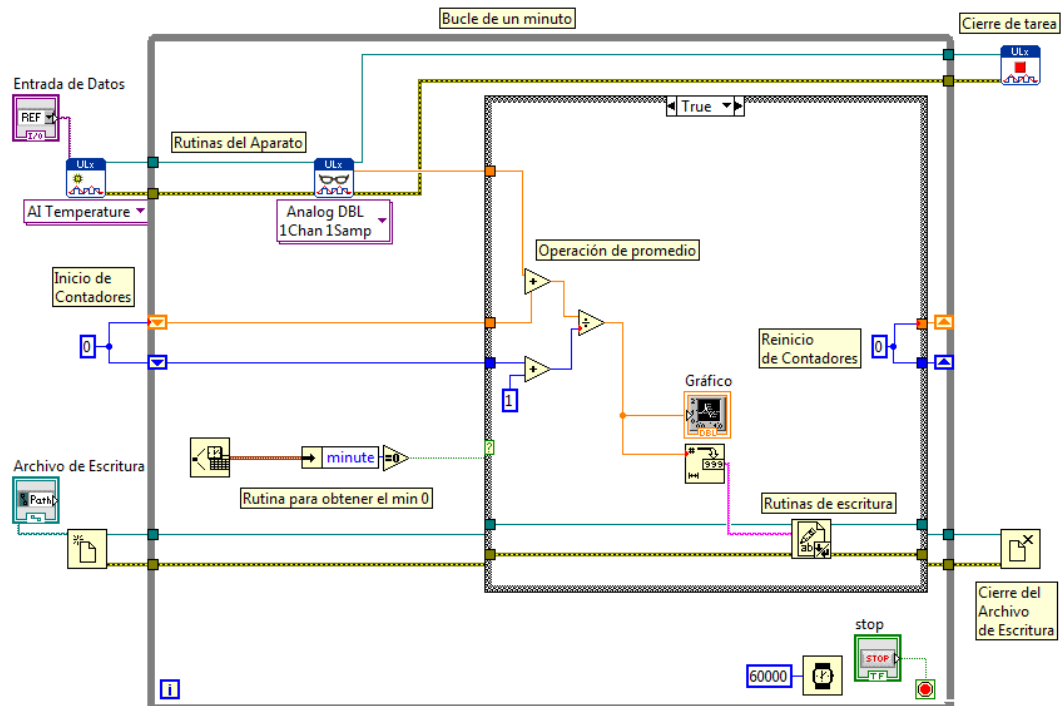
El dato es luego leído con otro bloque “Read” de ULx de donde es llevado a las operaciones que calculan el promedio de la hora. Cuando el programa se detiene y sale del ciclo, un bloque de cierre de tarea se activa y restaura las condiciones de inicio.

La figura 4.0.6 corresponde al estado del programa cuando no se cumple la condición del minuto “0” de cada hora.



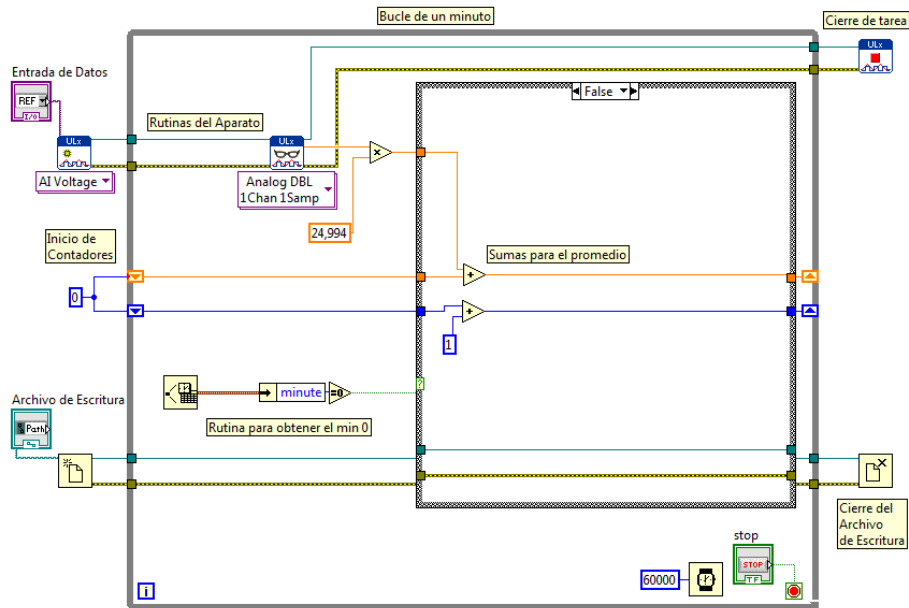
**Fig. 4.0.6 Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado al USB-TC cuando la condición de la hora exacta es falsa.**

Cuando se cumple la condición de minuto 0, el diagrama pasa a ser el de la Fig. 4.0.7 donde se realiza la última suma y la división del acumulado entre el contador para hallar el promedio, el dato resultante se escribe en un archivo de texto. Posteriormente se reinician las cuentas del acumulado y el contador

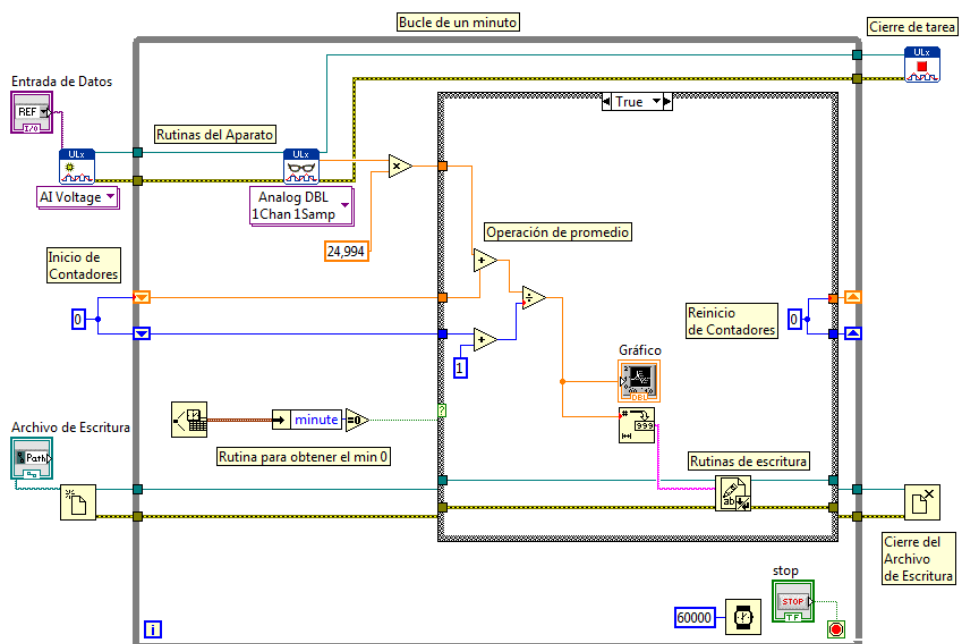


**Fig. 4.0.7 Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado al USB-TC cuando la condición de la hora exacta es verdadera.**

La tarjeta USB-12081S funciona de forma muy parecida a la tarjeta USB-TC, usando la librería ULx for LabVIEW. La diferencia es que el canal virtual ya no es de temperatura sino de voltaje, por lo que el dato analógico debe ser manipulado matemáticamente para hallar el valor de la variable de proceso. El resto del diagrama es igual, como puede apreciarse en las figuras 4.0.8 y 4.0.9.

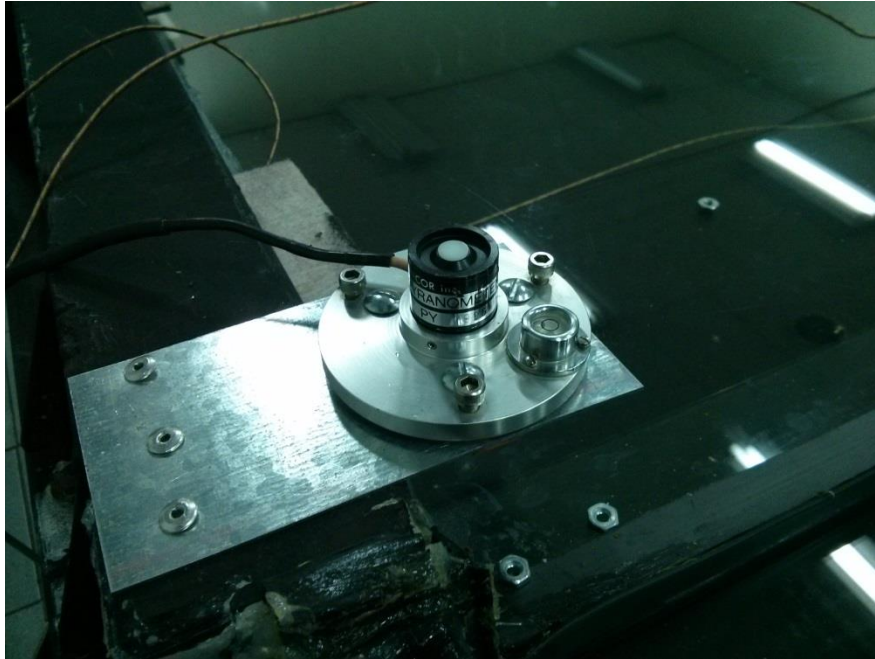


**Fig. 4.0.8** Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado a la tarjeta USB-12081S cuando la condición de la hora exacta es falsa.



**Fig. 4.0.9** Ejemplo del diagrama de bloques de un instrumento conectado a la tarjeta USB-12081S cuando la condición de la hora exacta es verdadera.

Debido a problemas con la estación DAVIS Vantage Pro 2 fue necesario por momentos reemplazar su medidor de radiación solar por un Piranómetro tipo Li-cor 200 (Fig. 4.0.10) conectado a la tarjeta USB-12081S a través de un acondicionador de señal modelo ACS2000 (Fig. 4.0.11), El arreglo medidor-acondicionador entrega un valor de 1 milivoltio por cada  $333,33 \text{ W/m}^2$  de irradiación.



**Fig. 4.0.10 Medidor de Radiación externo modelo Li-cor 200.**

En el caso de estación meteorológica DAVIS Vantage pro 2, La compañía DAVIS suministra su propia librería para uso en LabVIEW llamada simplemente Vantage, que funcionan de forma similar a las suministradas por Measurement Computing en ULx.

Al usar los bloques Vantage en lugar de crear un canal virtual y leerlo con dos bloques como en el caso de las tarjetas, hubo que abrir manualmente el canal de comunicación entre la estación y la computadora, iniciar la comunicación, configurarla, cargar los datos y luego filtrarlos, todo por separado. El resto del diagrama, como se puede observar en las figuras 4.0.12 y 4.0.13, es el mismo.

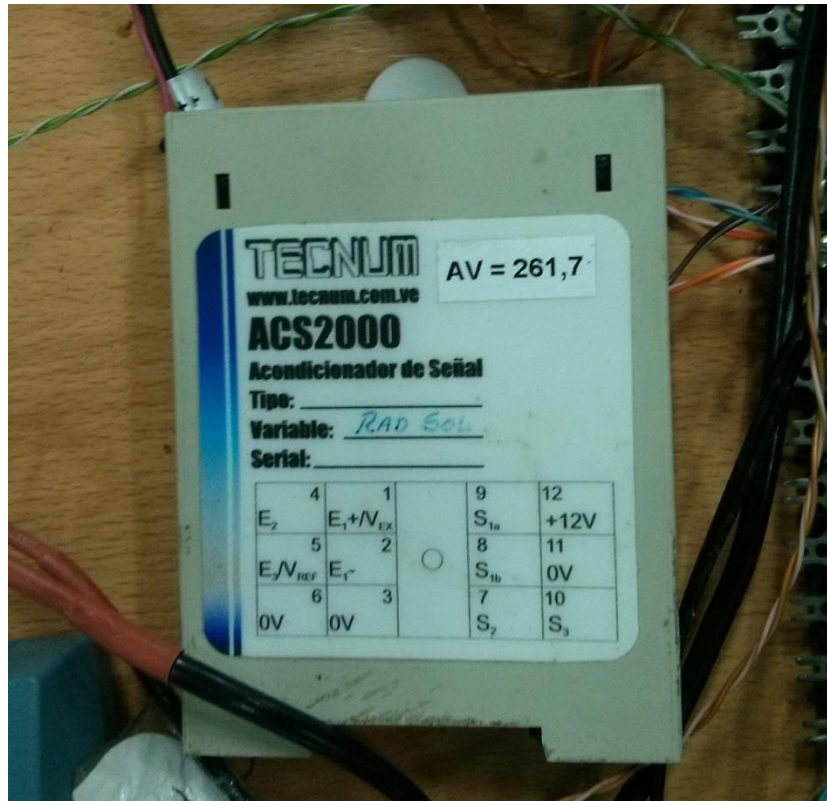


Fig. 4.0.11 Acondicionador de señal ACS2000 usado.

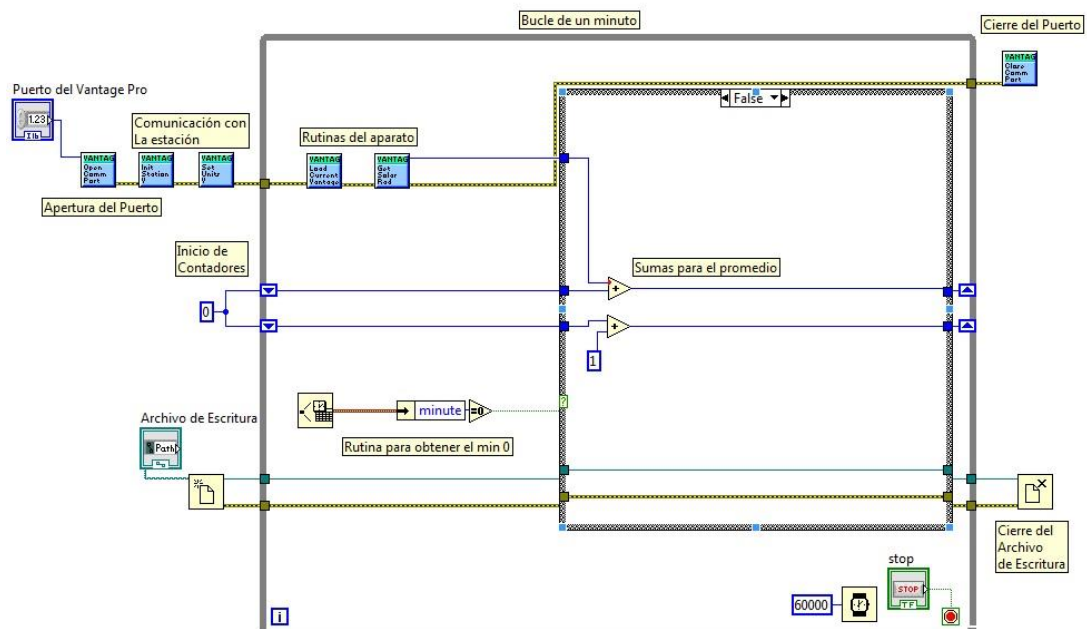
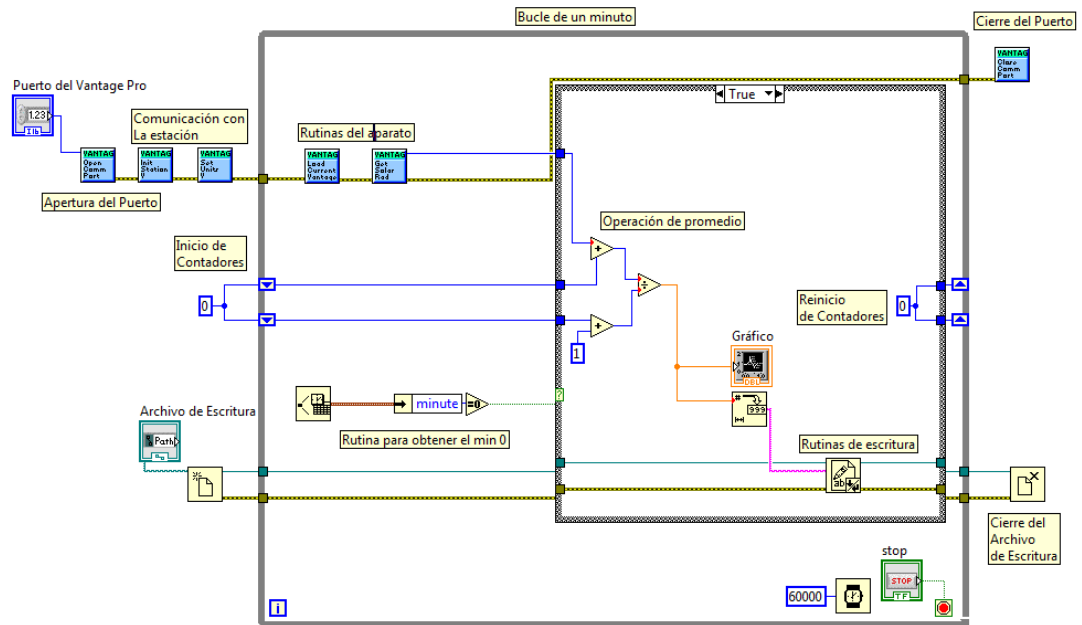


Fig. 4.0.12 Ejemplo del diagrama de bloques de la rutina de lectura de la radiación solar cuando la condición de la hora exacta es falsa.



**Fig. 4.0.13 Ejemplo del diagrama de bloques de la rutina de lectura de la radiación solar cuando la condición de la hora exacta es verdadera.**

La escritura de las cadenas de caracteres para su guardado se hace a un único archivo de forma ordenada usando bloques de concatenado que unen los siguientes datos:

- Fecha.
- Hora.
- Radiación.
- Medidas según la posición de la termocupla y el número del desalinizador.
- Salto de línea.

Entre dato y dato se agrega un carácter de tabulación, lo que permite exportar el texto a una hoja de cálculo. El Archivo de texto final se presenta como en la figura 4.0.14.

El encabezado se agrega de la misma forma que los datos, antes del inicio del bucle.

Fecha	Hora	Radiación	Agua 4	Vidrio 4	Agua 5	Inter 5	Vidrio 5	Agua 6	Inter 6	Vidrio 6
24/10/2013	09:00 a. m.	755	52	32	33	47	52	31	46	51
24/10/2013	10:00 a. m.	890	57	36	36	53	58	35	53	56
24/10/2013	11:00 a. m.	928	61	43	43	58	61	43	60	60
24/10/2013	12:00 p. m.	867	63	49	49	60	64	50	62	61
24/10/2013	01:00 p. m.	458	56	51	51	56	58	52	57	56
24/10/2013	02:00 p. m.	710	64	52	51	61	65	51	60	62
24/10/2013	03:00 p. m.	231	53	51	50	52	55	50	53	52
24/10/2013	04:00 p. m.	281	53	47	46	48	53	46	48	52

**Fig. 4.0.14** Tabla de datos exportada por NI LabVIEW.

Adicional a los promedios, para ciertos momentos se llevaron gráficos en tiempo real de valores de ciertas termocuplas y de la irradiación solar. Los gráficos fueron exportados a Microsoft Excel.

En los momentos durante la realización del proyecto que se presentaron problemas técnicos tanto con la estación DAVIS Vantage Pro 2 como el Piranómetro Li-Cor 200 su información fue sustituida por datos recogidos por el departamento de hidrometeorología de la Universidad Central de Venezuela y una estación similar modelo Vantage, ubicada en San Bernardino con el identificador IDCCARAC3, parte de la red de [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com).

## CAPITULO 5

### METODOLOGÍA DE ESTUDIO

#### 3.1 Instalación

Los desalinizadores se instalaron formando una sola línea orientada hacia al sur como se observa en la Fig. 5.1, se colocaron sobre una viga de soporte que se encuentra en el lado este de la azotea del Edificio Luis Damiani de la Escuela Básica de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, y luego se colocaron los recipientes de recolección a un nivel más bajo para así facilitar el escurrimiento del agua condensada hacia los mismos (fig. 5.2) , los recipiente de recolección fueron sellados herméticamente y protegidos de la radiación solar directa para evitar la evaporación del agua recolectada.



**Fig. 5.0.1 Desalinizadores orientados hacia el sur.**



**Fig. 5.0.2 Recipientes de recolección.**

Los tanques de alimentación de agua se instalaron a una distancia prudencial para evitar que estos hicieran sombra sobre los desalinizadores.

Para asegurar que el nivel de agua tuviese un nivel constante se procedió a unir todos los desalinizadores a través de una tubería de PVC en la parte más baja de una de las paredes de cada desalinizador, dicha tubería es la que proporciona presión de agua para surtir a cada desalinizador a medida de que el agua es evaporada y condensada, al estar unidos recibiendo todos la misma presión a la misma cota se asegura un nivel de agua constante como se muestra en la Fig. 5.3, esto último gracias a que los desalinizadores están a su vez unidos a un tanque que posee un sistema de control de nivel mediante una boya (fig. 5.4).

Se mantuvo un nivel de 5 cm en la bandeja de agua.

A partir del día 21 de octubre de 2013 se agregaron 40 gramos de sal común por litro de agua al sistema y se removió para asegurar la homogeneidad en la mezcla agua-sal, se eligió tal valor de concentración por ser el valor medio entre 35.000 p.p.m. y 45.000 p.p.m. que son los límites de salinidad sobre la tierra, como se explicó en el punto 2.1 del presente trabajo.



**Fig. 5.0.3 Unión entre desalinizadores.**



**Fig. 5.0.4 Tanque de control de nivel.**

### **3.2 Recolección de datos.**

Se hicieron mediciones durante dos semanas, en la primera semana se destiló agua dulce y en la segunda semana se utilizó agua salada preparada a una concentración de 40 gramos por litro.

Se hizo una medición de la masa de agua contenida en cada recipiente en la mañana y a una hora cercana a la puesta del sol. No se consideraron válidas las tomas del día 1 ni las correspondientes a las mañanas del 2 y el 3.

Además de realizar la toma de datos, cada día en la mañana cuando se tenía acceso al edificio de la Escuela Básica de Ingeniería se instalaron los medidores de temperatura y

radiación conectando las termocuplas a la tarjeta USB-TC, conectando el piranómetro a la tarjeta USB-1208LS y conectando las tarjetas a la computadora con la cual se realizaba el procesamiento y registro de los datos iniciando el programa NI LabView.

El equipo de medición (salvo las termocuplas) se desmontaron cada día luego de realizar la toma de la noche.

## CAPITULO 6

### RESULTADOS

Generalmente se estila presentar la producción de este tipo de desalinizadores como kilogramos de agua producidos por metro cuadrado de área de colección solar, es por ello que se presentan las siguientes tablas de producción para cada desalinizador.

En las tablas 6.0.1, 6.0.2, 6.0.3, 6.0.5 y 6.0.6 los números en color rojo representan los datos que se consideraron erróneos o poco confiables, ya que al momento de su registro se visualizaron fugas en el camino del agua condensada, una incorrecta colocación de la superficie colectora y/o en general cualquier factor externo que claramente pudo afectar los resultados, es por ello que dichos datos no se consideraron al momento de realizar cualquier cálculo.

DESALINIZADOR	15/.10/2013 10:00 am- 4:30pm	16/10/2013. 9:00 am- 4:30pm	17/10/2013. 8:30 am- 4:30pm	18/10/2013. 9:00 am- 4:30pm
1	0,28	0,336	0,168	0,28
2	0,056	0,36	0,168	0,232
3	0,388	0,432	0,192	0,4
4	0,192	0,352	0,2	0,456
5	0,08	0,352	0,288	0,048
6	0,2	0,124	0,304	0,496
7	0,384	0,672	0,328	0,64
8	0,368	0,496	0,24	0,448
9	0,152	0,48	0,192	0,344

**Tabla 6.0.1 Producción horas con sol kg/m<sup>2</sup>.**

DESALINIZADOR	21/10/13. 8:20a.m- 4:30pm	22/10/13. 8:55am- 6:30pm	23/10/13. 8:20am- 4:42pm	24/10/13. 8:23am- 4:40pm	25/10/13. 8:20am- 4:40pm
1	0,216	0,456	0,544	0,536	0,632
2	0,144	0,448	0,44	0,416	0,488
3	0,232	0,4	0,528	0,472	0,544
4	0,248	0,488	0,616	0,616	0,768
5	0,384	0,544	0,664	0,592	0,664
6	0,216	0,496	0,656	0,056	0,836
7	0,384	0,616	0,84	0,744	0,84
8	0,408	0,632	0,744	0,752	0,872
9	0,608	0,584	0,56	0,656	0,76

**Tabla 6.0.2 Producción horas con sol en kg/m<sup>2</sup>.**

Se calculó el valor promedio de agua producida por día durante las horas de sol a partir de las tablas 6.0.1 y 6.0.2 (Tabla 6.0.3).

DESALINIZADOR	PROMEDIO kg/m <sup>2</sup>
1	0,383
2	0,306
3	0,399
4	0,437
5	0,402
6	0,416
7	0,605
8	0,551
9	0,482

**Tabla 6.0.3 Producción promedio horas con sol en kg/m<sup>2</sup>.**

DESALINIZADOR	16/10/13- 4:30p.m. 17/10/13-8:30a.m	17/10/13-4:30p.m. 18/10/13-9:00a.m.	21/10/13- 4:30pm 22/10/13- 8:55pm
1	0,508	0,392	0,4
2	0,512	0,648	0,224
3	0,632	0,436	0,448
4	0,552	0,472	0,408
5	0,28	0,52	0,48
6	0	0,336	0,368
7	0,62	0,44	0,48
8	0,592	0,192	0,512
9	0,616	0,488	0,52

**Tabla 6.0.4 Producción horas sin sol en kg/m<sup>2</sup>.**

DESALINIZADOR	22/10/13- 6:30pm 23/10/13- 8:20am	23/10/13- 4:42pm 24/10/13- 8:23am	24/10/13- 4:40pm 25/10/13- 8:20am	25/10/13- 4:40pm 26/10/13- 8:30am
1	0,248	0,472	0,544	0,536
2	0,372	0,512	0,552	0,528
3	0,272	0,504	0,584	0,624
4	0,248	0,52	0,304	0,528
5	0,456	0,544	0,584	0,56
6	0,232	0,464	0,576	0,504
7	0,304	0,552	0,632	0,552
8	0,348	0,624	0,728	0,736
9	0,776	0,624	0,688	0,76

**Tabla 6.0.5 Producción horas sin sol en kg/m<sup>2</sup>.**

Se calculó el valor promedio de agua producida por día durante las horas sin sol a partir de las tablas 6.0.4 y 6.0.5 (Tabla 6.0.6).

DESALINIZADOR	PROMEDIO Kg/m <sup>2</sup>
1	0,442
2	0,478
3	0,500
4	0,433
5	0,489
6	0,413
7	0,511
8	0,533
9	0,638

**Tabla 6.0.6 Producción promedio horas sin sol en kg/m<sup>2</sup>.**

Energía/día [KWh/día]	5645,3	5513,5	6518,2
DESALINIZADOR	16/10/13-9:00a.m. 17/10/13-8:30a.m	17/10/13-8:30a.m. 18/10/13-9:00a.m.	21/10/13-8:20am 22/10/13-8:55am
1	0,844	0,56	0,616
2	0,872	0,816	0,368
3	1,064	0,628	0,68
4	0,904	0,672	0,656
5	0,632	0,808	0,864
6	0,124	0,64	0,584
7	1,292	0,768	0,864
8	1,088	0,432	0,92
9	1,096	0,68	1,128

**Tabla 6.0.7 Producción Kg/m<sup>2</sup> en 24 horas.**

Energía/día [KWh/día]	6531,9	4435,3	6895,7	5852,7
	22/10/13- 8:55am	23/10/13-8:20am	24/10/13- 8:23am	25/10/13-8:20am
DESALINIZADOR	23/10/13- 8:20am	24/10/13-8:23am	25/10/13- 8:20am	26/10/13-8:30am
1	0,704	1,016	1,08	1,168
2	0,82	0,952	0,968	1,016
3	0,672	1,032	1,056	1,168
4	0,736	1,136	0,92	1,296
5	1	1,208	1,176	1,224
6	0,728	1,12	0,632	1,256
7	0,92	1,392	1,376	1,392
8	0,98	1,368	1,48	1,608
9	1,36	1,184	1,344	1,52

**Tabla 6.0.8 Producción en Kg/m<sup>2</sup> en 24 horas.**

Se calculó el valor promedio de agua producida por día durante las 24 horas a partir de las tablas 6.0.7 y 6.0.8 (Tabla 6.0.9).

DESALINIZADOR	Promedio Kg/m <sup>2</sup> /día
1	0,855
2	0,830
3	0,9
4	0,903
5	0,987
6	0,866
7	1,143
8	1,125
9	1,187

**Tabla 6.0.9 Producción promedio 24 horas kg/m<sup>2</sup>.**

La eficiencia se definió como:

$$\eta = \frac{m \cdot \mu_{f,g}(T_o)}{(\sum I' \cdot T) \cdot A_a}$$

### Ecuación 6.0.1

Donde la  $\eta$  es la eficiencia,  $m$  es la masa de agua producida en  $\text{Kg/m}^2$ ,  $\mu_{f,g}(T_o)$  es el calor latente de vaporización del agua a una temperatura de referencia para el ambiente de  $30^\circ\text{C}$ ,  $A_a$  es el área de apertura en  $\text{m}^2$  que es la proyección horizontal del área de la superficie cubierta y la sumatoria  $\sum I' \cdot T$  corresponde al total de la energía que ingresó ese día al sistema en  $\text{W/m}^2$ .

En la ecuación 6.0.1 el numerador representa la energía aprovechada por el desalinizador para producir agua destilada, y el denominador representa la energía disponible para el desalinizador.

DESALINIZADOR	16/10/13- 9:00a.m. 17/10/13- 8:30a.m	17/10/13- 8:30a.m. 18/10/13- 9:00a.m.	21/10/13- 8:20am 22/10/13- 8:55am	22/10/13- 8:55am 23/10/13- 8:20am
1	33,56%	20,68%	20,41%	36,39%
2	36,34%	31,58%	12,78%	44,43%
3	48,11%	26,37%	25,62%	39,50%
4	35,95%	24,81%	21,74%	38,05%
5	26,34%	31,27%	30,01%	54,18%
6	5,61%	26,87%	22,01%	42,79%
7	51,37%	28,36%	28,63%	47,56%
8	45,34%	16,72%	31,95%	53,1%
9	49,56%	28,55%	42,51%	79,95%
Energía/día [KWh/día]	5645,3	5513,5	6518,2	6531,9

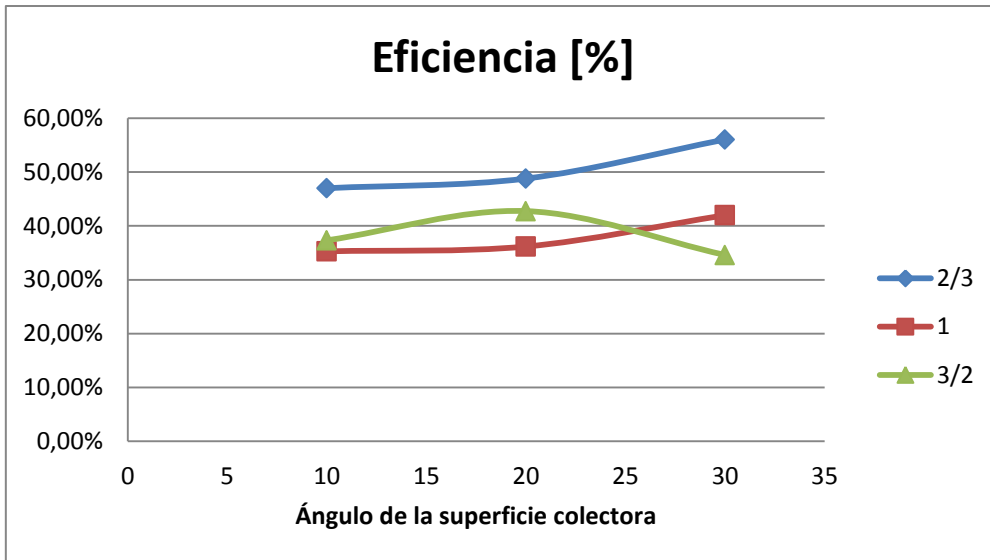
**Tabla 6.0.10 Eficiencia diaria por desalinizador.**

DESALINIZADOR	23/10/13-8:20am 24/10/13-8:23am	24/10/13-8:23am 25/10/13-8:20am	25/10/13-8:20am 26/10/13-8:30am
1	43,77%	40,48%	51,58%
2	42,98%	38,03%	47,03%
3	50,55%	45,01%	58,66%
4	48,94%	34,48%	57,23%
5	54,54%	46,2%	56,65%
6	54,86%	26,24%	63,08%
7	59,96%	51,57%	61,47%
8	61,76%	58,14%	74,93%
9	58,0%	57,29%	76,33%
Energía/día [KWh/día]	4435,3	6895,7	5852,7

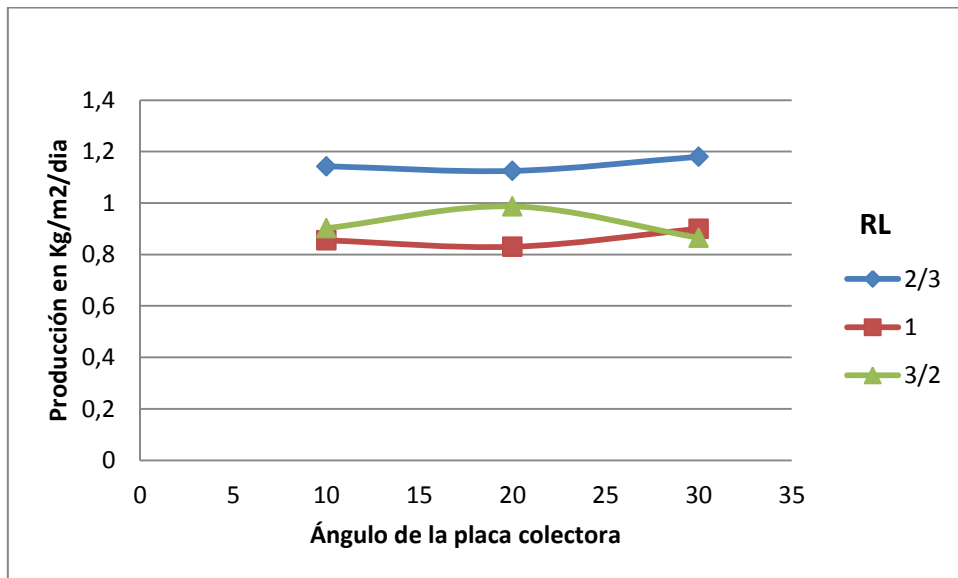
**Tabla 6.0.11 Eficiencia diaria por desalinizador.**

Desalinizador	Eficiencia promedio
1	35,27%
2	36,17%
3	41,98%
4	37,31%
5	42,74%
6	34,59%
7	46,99%
8	48,78%
9	56,03%

**Tabla 6.0.12 Eficiencia promedio por desalinizador.**

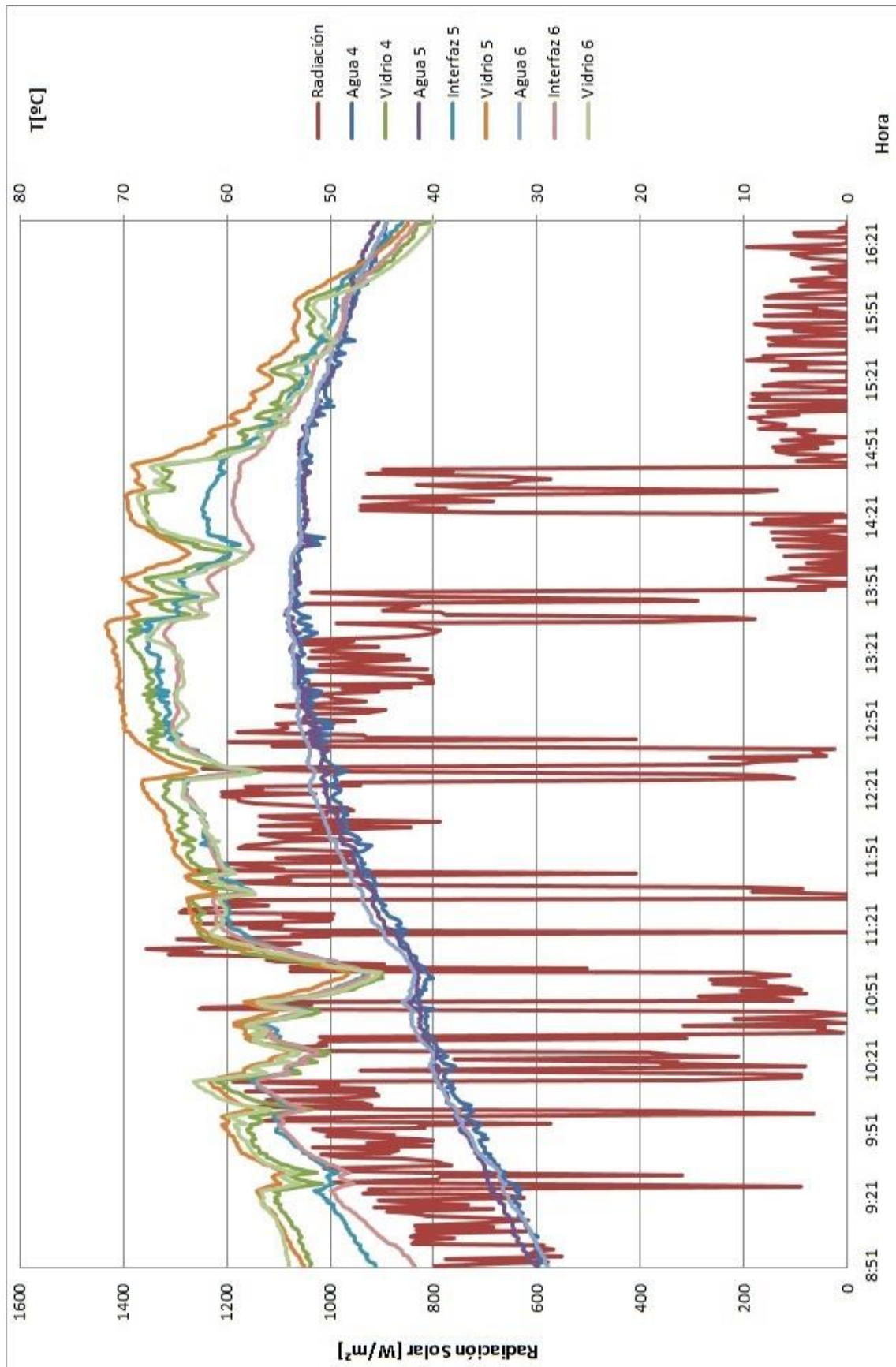


**Fig. 6.0.1 Comportamiento de la eficiencia promedio de las tres series de desalinizadores.**



**Fig. 6.0.2 Comportamiento de la producción promedio de las tres series de desalinizadores.**

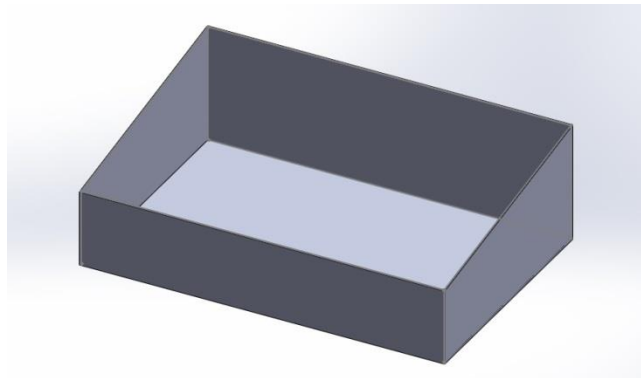
Para visualizar el comportamiento térmico de los desalinizadores se realizó el gráfico de la Fig. 6.0.3 donde el eje “x” es el eje que representa el tiempo y se muestran dos ejes “y” uno donde se muestra la temperatura en grados Celsius y el otro que corresponde a la radiación expresada en Watt por metro cuadrado.



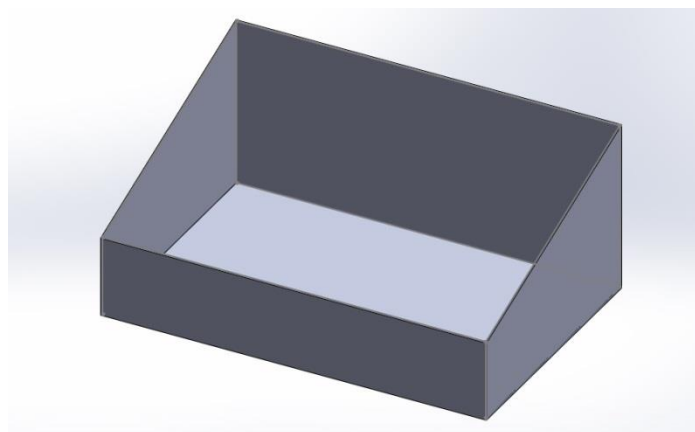
**Fig. 6.0.3 Comportamiento térmico de los desalinizadores, tomado el 24 de octubre de 2013.**

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

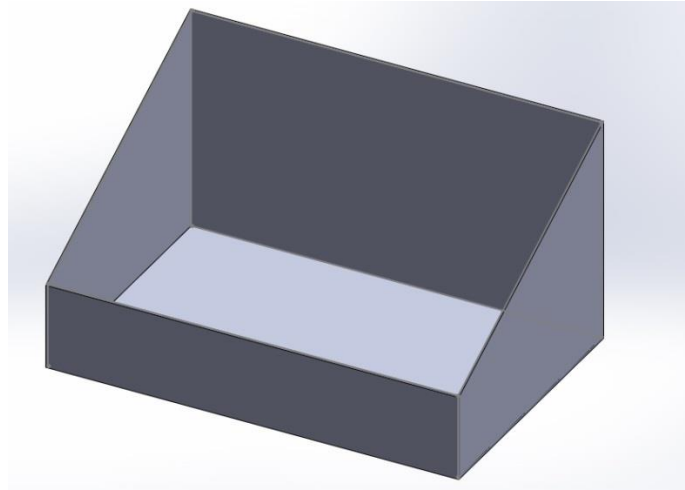
En la tabla 6.0.3 se observa que la configuración que tuvo mayor producción durante las horas de sol fue la número 7 (Fig 6.0.4) que llegó a producir 0,605 kg/m<sup>2</sup>.día de promedio, seguida por la número 8 (Fig 6.0.5) cuya producción promedio diaria fue 0,551 kg/m<sup>2</sup>, ambas configuraciones son más anchas que largas y tienen un ángulo de inclinación del vidrio de 10° y 20° respectivamente, esto puede atribuirse a que al ser más anchos una gota de agua condensada en el extremo opuesto al canal tiene más probabilidad de escurrir hasta el mismo sin caer nuevamente en el fondo del desalinizador ya que su trayectoria es más corta, además una inclinación cercana a la latitud donde se instalaron los dispositivos es decir 10°30'N permite un mayor aprovechamiento de la radiación por lo tanto ingresa mayor energía al desalinizador y aumenta la velocidad de evaporación.



**Fig. 6.0.4 Dibujo en CAD del desalinizador 7.**



**Fig. 6.0.5 Dibujo en CAD del desalinizador 8.**



**Fig. 6.0.6 Dibujo en CAD del desalinizador 9.**

De la tabla 6.0.6 la configuración con mayor producción durante las horas sin sol es la número 9 (Fig. 6.0.6) que en promedio produjo diariamente  $0,638 \text{ kg/m}^2$ , seguida por la número 8 cuya producción promedio diaria fue  $0,533 \text{ kg/m}^2$ , nuevamente estas tienen la característica de que son más anchas que largas y tienen un ángulo de inclinación de la superficie colectora de  $30^\circ$  y  $20^\circ$  respectivamente, de nuevo se presenta la ventaja que tienen estos al momento del escurrimiento de la gota condensada en el vidrio hacia el canal, posteriormente se tiene que la mejor producción se obtuvo con un ángulo de  $30^\circ$ , esto posiblemente es debido a que dicho ángulo favorece el escurrimiento del agua condensada, cabe destacar que la producción durante estas horas se debe a que el dispositivo posee una inercia térmica durante las primeras horas de la noche lo cual permite que el proceso siga siempre y cuando se mantenga el proceso de evaporación y condensación que será más eficiente mientras la temperatura del vidrio sea inferior a la temperatura interna del desalinizador, lo que se logra las primeras horas luego de que se oculte el sol.

Luego se tiene que para la producción total diaria (24 horas) la configuración con mayor producción es la número 9 con un promedio diario de  $1,187 \text{ kg/m}^2$ , seguida por la número 7 cuyo promedio diario fue  $1,143 \text{ kg/m}^2$  (ver tabla 6.0.9), se tiene entonces que la producción durante la noche fue más importante que la producción durante el día.

De las tablas 6.0.8 y 6.0.7 la configuración que más produce durante el día más soleado es la número 8 mientras que la que produce más con el día más nublado es la número 7. Lo anterior podría ser producto de la mayor capacidad que tiene el número 7 de absorber energía del sol, característica que se hace más crítica en los días más nublados.

En cuanto a la eficiencia en la figura 6.0.1 se observa un comportamiento diferente para la serie de desalinizadores cuyo largo/ancho es 2/3 en que la eficiencia no sigue el mismo patrón que con las otras series, en general se puede observar al comparar las figuras 6.0.1 y 6.0.2 que los gráficos de eficiencia promedio y producción promedio tienen formas similares, pero los más eficientes no son necesariamente los más productivos.

El más eficiente y productivo fue el desalinizador número 9 con una eficiencia promedio de 3,84% y una producción promedio de 1,19 Kg/m<sup>2</sup>/día, sin embargo el segundo desalinizador más eficiente no coincide con el segundo desalinizador más productivo, siendo el segundo más eficiente el 8 (3,35% de eficiencia y 1,13 Kg/m<sup>2</sup>/día de producción) y el segundo más productivo el 7 (1,14 Kg/m<sup>2</sup>/día de producción y 3,22% de eficiencia). En el otro extremo tampoco coinciden el desalinizador menos eficiente, que fue el 6 con 2,37% con el menos productivo, que fue el 2, con 0,83 Kg/m<sup>2</sup>/día.

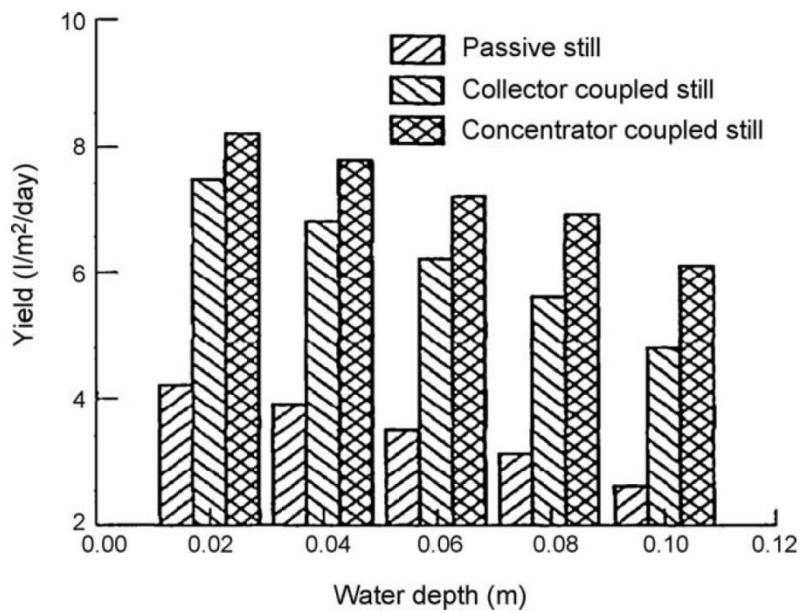
En el día más soleado que fue el 21 de octubre, el desalinizador más eficiente fue también el más productivo (El número 9 con 2,92% de eficiencia y 1,13) y el menos eficiente el menos productivo (El número 2 con 0,87% de eficiencia y 0,368 Kg/m<sup>2</sup>/día). Mientras tanto en el día menos soleado que fue el 22 de octubre, el desalinizador más eficiente fue también el más productivo (El número 9 con 5,48% de eficiencia y 1,36 Kg/m<sup>2</sup>/día) pero el menos eficiente (El 1, que produjo 0,7 Kg/m<sup>2</sup>/día con una eficiencia de 2,5%) no fue el menos productivo (El número 3 con 2,71% de eficiencia y 0,67 Kg/m<sup>2</sup>/día). Es posible que otros factores ambientales como la temperatura ambiente, humedad y velocidad del viento afectaron la eficiencia en alguno de los dos días.

No se observó una diferencia clara entre las producciones de los días donde se usó agua salada versus los días con agua dulce, posiblemente la muestra es muy pequeña para realmente evaluar esto, tomando en cuenta cuantas variables existen que modifican la producción de agua.

En la figura 6.0.3 se observa que durante las horas de mayor radiación la menor temperatura del sistema es la del agua y la temperatura de la interfaz es muy parecida a la temperatura del vidrio siendo la primera ligeramente menor. Igualmente se observa que mientras aumenta la radiación aumenta también la temperatura en los tres niveles, durante y después del ocaso todas las temperaturas empiezan a caer, las temperaturas del vidrio y de la interfaz descienden a una tasa mayor que la del agua, efecto de la convección sobre la superficie del vidrio. Ya entrada la noche la distribución de temperaturas interna del desalinizador se invierte y el agua pasa a tener la mayor temperatura favoreciendo la evaporación y condensación en el vidrio hasta que todas las temperaturas alcanzan la temperatura ambiente.

En la misma figura 6.0.3 se evidencia que el desalinizador 5 tuvo en general mayor temperatura en el vidrio e interfaz que los demás y como se ve en la figura 6.0.9 fue el más productivo de los tres desalinizadores, lo cual apoya la hipótesis de que a mayor energía acumulada durante el día mayor la producción durante la noche y por ende mayor la producción en general.

En el gráfico de la figura 6.0.4 extraída del trabajo de Sampathkumar (2009) se observa que en sus experimentos halló que mientras mayor sea la profundidad del agua en la bandeja menor producción se obtendrá. Al ser modelos a escala con una profundidad relativamente grande para su tamaño los resultados obtenidos difieren a los conseguidos por Sampathkumar ya que con una profundidad de 5 cm el máximo logrado en éste trabajo fue 1,6 litros versus 4 litros para esa profundidad que asegura el autor.



**Fig. 6.0.7 Grafico comparativo Producción Vs Profundidad (fuente: K. Sampathkumar, T.V. Arjunan (2010) Active solar distillation- A detailed review (p.9)).**

## CONCLUSIONES

1. Los desalinizadores cuya cubierta transparente tienen una relación largo/ancho de  $2/3$  produjeron en promedio más que los demás en todo momento.
2. Entre los desalinizadores antes mencionados, en promedio el ángulo más plano (desalinizador 7) produjo más durante el día pero el ángulo más vertical produjo más tanto de noche como sobre un día completo (desalinizador 9).
3. El desalinizador recomendado por ser el de mayor producción resultó el desalinizador 9, que tiene una relación largo/ancho de  $2/3$  y un ángulo de  $30^\circ$  en su superficie colectora.
4. La producción promedio para todos los días fue mayor durante el período de enfriamiento (noche) que durante el día.
5. Los desalinizadores más eficientes térmicamente fueron los más productivos.
6. Las eficiencias calculadas fueron menores al 60%.
7. Durante el día la distribución de temperatura fue diferente a la presumida, siendo más caliente en el vidrio que en el agua, durante la noche tal gradiente se invirtió pues la tasa de enfriamiento del agua fue mucho menor al resto del sistema.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar experimentos sobre un período mayor de tiempo.
2. Hacer experimentos con prototipos de mayor área de colección usando las características geométricas que produjeron más en éste trabajo.
3. Realizar experimentos para corroborar el efecto del color negro del desalinizador.
4. Realizar experimentos con cubiertas de otros materiales transparentes.
5. Hacer pruebas de campo con los desalinizadores tanto pequeños como a mayor escala, tomando diversas locaciones en el territorio nacional.
6. Realizar un rediseño de los desalinizadores para las pruebas de campo, se recomienda usar otro casco de fibra de vidrio como superficie externa para proteger el material aislante.
7. Utilizar múltiples tanques de control de nivel para arreglos de múltiples desalinizadores para reducir las pérdidas de carga que dificultan el control de tal nivel.
8. Buscar incrementar la capacidad para la lectura de datos de temperatura en tiempo real por parte de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, tal que en experimentos futuros se puedan realizar comparaciones de más temperaturas al mismo tiempo.

## BIBLIOGRAFIA

Arunkumar, T. , Vinothkumar, K. , Ahsan, A. , Jayaprakash, R. y Sanjay Kumar, Sanjay. (2012). Experimental Study on Various Solar Still Designs.

De Oliveira, A. y Sosa, F. (2001) Desarrollo de un Modelo de Desalinización y Potabilización de Agua de Mar con Energía Solar. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela.

Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., Lavine, A. ( 2007). Introduction to Heat Transfer (5ta Edición), John Wiley & Sons.

Larios, L. y Teixeira, J. (2004). Diseño y Construcción de un Deshidratador Indirecto de Cacao Mediante el Uso de Aire Calentado por Energía Solar. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuel.

Nieves, L. y Machado, H. (1977). Caldera Solar para Desalinizar Agua de Mar. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela.

Pocaterra, J. (2002). Diseño de Planta Experimental de Desalinización Solar para Abastecer de agua Potable a Zonas Rurales de la Guajira Venezolana. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela.

Salani, L. y Bront, W. (1983). Diseño, Construcción y Pruebas de un Colector Solar Plano de Doble Reflexión. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela.

Sampathkumar, K., Arjunan, T., Pitchandi, P., y Senthilkumar P. (2009). Active solar distillation—A detailed review.

Stephany, R.. *A Model for Operation of a Single-Basin Solar Still*. Trabajo especial de grado, Sapienza Università Di Roma, 2012

Van Wylen, G., Sonntag, R. y Borgnakke, C. (2009). Fundamentos de Termodinámica (Segunda Edición). Limusa Wiley.

Ley Orgánica de Descentralización, (2003). *Gaceta Oficial de la República de Venezuela* número 37.753.

## REFERENCIAS ELECTRONICAS

Acuña, R. (2011). Desarrollo de un prototipo de desalinizador solar de agua de mar mediante humidificación de aire de bajo costo para comunidades remotas. Recuperado el 9 de Noviembre de 2012 en: [http://www.3g.com.ve/energia/Presentacion\\_R\\_Gonzalez\\_Acuna\\_INDENE\\_baja\\_resolucion.pdf](http://www.3g.com.ve/energia/Presentacion_R_Gonzalez_Acuna_INDENE_baja_resolucion.pdf).

Baeza, V. R. (2011). Formulación, implementación y validación experimental de un modelo computacional para desalinizadores solares de agua de una etapa mediante programación estructurada por bloques. Recuperado el 1 de Noviembre de 2012 en: <http://www.gea.usm.cl/wp-content/uploads/2012/06/Trabajo-de-Titulo-Vicente-Olavarria.pdf>.

Ciccoella, I., Carrizo, A. y Chirinos, J. A. (2007). Destilador de agua solar: alternativa para potabilizar agua en zonas rurales. Determinación de costos. Recuperado el 8 de noviembre de 2012 en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/27724/1/articulo7.pdf>.

Duffie, J. y Beckman, W. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes (Tercera Edición, Capítulo 1 y 2). Recuperado el 19 de Agosto de 2013 en: [http://web.ee.sun.ac.za/~pnwk/stuff/Klasnotas/Solar\\_Engineering\\_of\\_Thermal\\_Processes.pdf](http://web.ee.sun.ac.za/~pnwk/stuff/Klasnotas/Solar_Engineering_of_Thermal_Processes.pdf).

Fundación Azul Ambientalistas. (2012). Situación del agua potable en Venezuela. Recuperado 29 de Noviembre de 2012 en: <http://blogdenotas.azulambientalistas.org/?p=376>.

Gordes, J. y McCracken, H. (s.f.) Understanding solar stills. Recuperado el 8 de Noviembre de 2012, en [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNABC961.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABC961.pdf).

Kalogirou, S. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. Recuperado el 20 de Agosto de 2013 en: <http://membrane.ustc.edu.cn/paper/pdf/Seawater%20desalination%20using%20renewable%20energy%20sources.pdf>.

Lameda, R. (2013, 18 de Junio). “En 2013 se han registrado 534 apagones”. Diario el Impulso. Recuperado el 30 de octubre de 2013 en: [www.elimpulso.com/articulo/En-2013-se-han-registrado-534-apagones#](http://www.elimpulso.com/articulo/En-2013-se-han-registrado-534-apagones#).

Maldonado, E. (2002). Estudio de factibilidad de la implementación de un Destilador Solar como abastecedor de agua de bebida a Partir del agua de mar para la base Naval de Baltra, Galápagos. Trabajo especial de grado, Escuela superior politécnica del litoral, Ecuador. Recuperado el 19 de Agosto de 2013 en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4341/1/6861.pdf>.

Müller, E (2002). Termodinámica Básica. Caracas, Venezuela. Recuperado el 19 de Octubre de 2013 en: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/16075696.PDF>.

Nandwani, S. (2009). Destilador solar - construcción, funcionamiento y uso. Recuperado el 9 de Noviembre de 2012 en: [http://www.una.ac.cr/fisica/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=6&Itemid=43](http://www.una.ac.cr/fisica/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=6&Itemid=43).

Organización Meteorológica mundial, 7ma edición (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Recuperado el 22 de Agosto de 2013 en:

[http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO\\_Guide-7th\\_Edition-2008.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf).

Patiño, J. (1989). Análisis comparativo de destiladores de agua con cubierta de plástico contra cubierta de vidrio. Trabajo especial de grado, Escuela superior politécnica del litoral, Ecuador. Recuperado el 19 de Agosto de 2013 en: [http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D\\_Tesis\\_PDF/D-9972.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-9972.pdf).

*Destilación y tipos de destilación.* Recuperado el 22 de Agosto de 2013 en: [http://www.alambiques.com/tecnicas\\_destilacion.htm](http://www.alambiques.com/tecnicas_destilacion.htm)

*Presión de vapor, Introducción.* Recuperado el 22 de agosto de 2013 en: <http://servicios.encb.ipn.mx/polilibros/fisicoquimica/PRESION%20DE%20VAPOR/INTRODUCCION.htm>.

Tiempo Historial de IDCCARAC3, Recuperado el 29 de octubre de 2013 en: <http://www.wunderground.com/weatherstation/WXDailyHistory.asp?ID=IDCCARAC3&day=29&month=10&year=2013>.

*Un apagón afectó Caracas y varios estado2 del país el martes en horas del mediodía.* Recuperado el 30 de octubre de 2013 en: <http://www.noticias24.com/venezuela/noticia/191104/un-apagon-masivo-afecta-a-caracas-y-varias-zonas-de-venezuela/>.

