



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA**

**“EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN EN UN DESTILADOR SOLAR CON SUPERFICIE EVAPORATIVA AUMENTADA”**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**I.I.S. FABRICIO IZCARET VALLE PONCE**

**TUTORA**  
**DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CO-TUTOR**  
**DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS**  
**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente:	M. en C. Rafael Almanza Salgado
Secretario:	Dr. José Luis Fernández Zayas
1er. Vocal:	Dr. Bernd Weber
2do. Vocal:	Dr. Rodolfo Sosa Echeverría
3er. Vocal:	Dra. Ana Elisa Silva Martínez

Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria.

### **TUTOR DE TESIS**

Dra. Ana Elisa Silva Martínez

-----  
**FIRMA**

## Síntesis

Este trabajo de tesis de maestría se enfoca en evaluar un destilador solar activo de agua de mar, del tipo caseta, dentro del cual se pueden cultivar especies vegetales, las cuales aumentan la superficie de evaporación. Para este estudio, se empleó una caseta, que ya estaba parcialmente disponible en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este trabajo se llevó a cabo en dos etapas, la primera de ellas fue el acondicionamiento y reparación, posteriormente en una segunda etapa se realizaron las adecuaciones y el acoplamiento de sistemas de medición. Para concluir este estudio con información experimental útil, se optó por centrar la atención de este último periodo en el sencillo pero fundamental proceso de evaporación de agua desde una superficie libre. Estos resultados se emplearán, en el futuro, para validar modelos matemáticos de simulación que faciliten el diseño de destiladores solares de caseta, utilizando diversos dispositivos que permitan aumentar la superficie efectiva de evaporación con respecto a la práctica habitual, mejorando su rendimiento y productividad.

## Resumen

La investigación presente aborda el tema de la desalación de agua salada para producir agua potable mediante destiladores solares directos. Se inspira en el trabajo pionero de la Dra. Ana Elisa Silva Martínez de Vega, quien demostró que al desacoplar la evaporación de agua por acción solar directa, del proceso de condensación, se pueden mejorar los rendimientos del destilador de manera significativa. Diversos trabajos recientes demuestran que este efecto se puede alcanzar de diversas maneras: por ejemplo, mediante un suministro auxiliar de calor a la bandeja evaporadora, o mediante el empleo de superficies de evaporación extendidas, y mediante la estimulación mecánica a la evaporación. Este trabajo ilustra, por un lado, el grado de complejidad que puede alcanzarse para aumentar de manera importante la superficie de evaporación, y para incrementar el proceso de condensación. Por otro lado, demuestra experimentalmente que se pueden aprovechar diversas técnicas de estímulo a la evaporación que eventualmente resultarían en un mejor rendimiento del destilador solar directo.

## *D e d i c a t o r i a*

*Esta tesis va dedicada en especial a mi papá que siempre he contado con su apoyo, confianza para culminar los diferentes proyectos que he emprendido.*

*A mi mamá, hermanas Dafne, Astrid, Quenya por su cariño, amor, comprensión, animo que siempre me han brindado.*

*A mis sobrinos Thanassis, Aitor por sus buenas vibras.*

*A Locky, mi perrito por su compañía.*

*A mi amiga la Dra. Liz Ferrer por su amistad y apoyo.*

*A mis amigos Mikis, Naye, Lupita, Israel, por su valiosa amistad.*

*A mis maestros UCDM, Andrea, Carlos y Sergio, por su gran cariño.*

*Y finalmente, Vero, Eunice y Sandy, por su apoyo, amistad durante estos dos años que estuvimos estudiando juntos.*

## *A g r a d e c i m i e n t o s*

*A la Dra. Ana Elisa Silva por brindarme la confianza en continuar con su línea de investigación sobre destilación solar.*

*Al Dr. José Luis Fernández Zayas, por su amistad, guía y apoyo para culminar exitosamente esta tesis.*

*Al Dr. Rodolfo Sosa, por sus aportaciones, asesoría en las diferentes etapas de este proyecto.*

*A la Facultad de Ingeniería por facilitar el uso de sus instalaciones.*

*Al personal del laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Natasha, Juanita y el Sr. Gerardo Herrera por su colaboración en el desarrollo de pruebas.*

*A la Maestra Angélica Quiñones del Instituto de Ingeniería de la UNAM por proporcionarme información sobre radiación solar.*

*Y al Consejo Nacional de la Ciencia y Tecnología (CONACYT ) por la beca otorgada para concluir este grado de Maestría.*

## Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO.....	2
1.2. ALCANCES / LIMITACIONES.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
<b>2. DESTILACIÓN SOLAR</b> .....	<b>4</b>
2.1. CLASIFICACION DE LOS DESTILADORES SOLARES.....	5
2.2. PRODUCTIVIDAD DE LOS DESTILADORES SOLARES.....	6
2.3. BALANCE DE ENERGÍA DE UN DESTILADOR SOLAR DE CASETA.....	7
2.3.1. <i>Balance de energía en la cubierta:</i> .....	8
2.3.2. <i>Balance de energía para la segunda cubierta:</i> .....	8
2.3.3. <i>Balance de energía en el agua:</i> .....	9
2.3.4. <i>Balance de energía en la bandeja:</i> .....	9
2.3.5. <i>Calor perdido por convección natural:</i> .....	10
2.4. APLICACIONES DESTILADORES SOLARES ACTIVOS.....	10
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>13</b>
3.1. Diseño del sistema de alimentación de agua.....	14
3.1.1. <i>Base para el tanque con agua</i> .....	15
3.1.2. <i>Colector solar plano</i> .....	17
3.1.3. <i>Líneas de conducción</i> .....	22
3.2. Sistema de extracción de vapor.....	26
<b>4. EXPERIMENTACIÓN</b> .....	<b>29</b>
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
5.1. Resultados experimentales de referencia.....	36
5.2. Comparación con las ecuaciones de Cooper.....	38
5.3. Comparación.....	39
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>40</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>41</b>
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>42</b>
<b>9. Anexos</b> .....	<b>45</b>
9.1. Anexo 1. Comparación entre los diferentes tipos de destiladores.....	45
9.2. Anexo 2. Programación en Just Basic.....	50
9.3. Anexo 3. Análisis de costos.....	54
9.4. Anexo 4. Experimentación.....	57
9.5. Anexo 5. Cálculos.....	99
9.5.1. <i>Colector solar plano</i> .....	99
9.5.2. <i>Sistema de flujo continuo de agua</i> .....	102
9.5.3. <i>Cálculo Sistema de Extracción</i> .....	106



# ÍNDICE

## TABLAS

TABLA 4.1: ANÁLISIS TIRANTE EXTERNO E INTERNO.....	31
TABLA 4.2: DATOS DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (INTERNA – EXTERNA). .....	33
TABLA 4.3: MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	34
TABLA 5.1: RESULTADOS FINALES OBTENIDOS.....	39
TABLA A1.1: COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES TIPOS DE DESTILADORES.....	48
TABLA A3.1 COLECTOR SOLAR PLANO.....	54
TABLA A3.2 TUBERÍA COLECTOR SOLAR PLANO.....	54
TABLA A3.3 SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE VAPOR.....	55
TABLA A3.4 SERPENTÍN.....	55
TABLA A3.5 LÍNEAS DE CONDUCCIÓN Y CONEXIONES.....	55
TABLA A3.6 BANCO CONTENEDOR DE AGUA SALADA.....	56
TABLA A3.7 BANCO COLECTOR SOLAR PLANO.....	56
TABLA A4.1 DIFERENCIA DE TIRANTE (3 MAYO 2017).....	57
TABLA A4.2 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (3 MAYO 2017).....	58
TABLA A4.3 RADIACIÓN SOLAR (3 MAYO 2017).....	59
TABLA A4.4 DIFERENCIA DE TIRANTE (4 MAYO 2017).....	60
TABLA A4.5 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (4 MAYO 2017).....	61
TABLA A4.6 RADIACIÓN SOLAR (4 MAYO 2017).....	62
TABLA A4.7 DIFERENCIA DE TIRANTE (5 MAYO 2017).....	63
TABLA A4.8 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (5 MAYO 2017).....	64
TABLA A4.9 RADIACIÓN SOLAR (5 MAYO 2017).....	65
TABLA A4.10 DIFERENCIA DE TIRANTE (8 MAYO 2017).....	66
TABLA A4.11 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (8 MAYO 2017).....	67
TABLA A4.12 RADIACIÓN SOLAR (8 MAYO 2017).....	68
TABLA A4.13 DIFERENCIA DE TIRANTE (11 MAYO 2017).....	69
TABLA A4.14 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (11 MAYO 2017).....	70
TABLA A4.15 RADIACIÓN SOLAR (12 MAYO 2017).....	71
TABLA A4.16 DIFERENCIA DE TIRANTE (12 MAYO 2017).....	72
TABLA A4.17 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (12 MAYO 2017).....	73
TABLA A4.18 RADIACIÓN SOLAR (12 MAYO 2017).....	74
TABLA A4.19 DIFERENCIA DE TIRANTE (16 MAYO 2017).....	75
TABLA A4.20 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (16 MAYO 2017).....	76
TABLA A4.21 RADIACIÓN SOLAR (16 MAYO 2017).....	77
TABLA A4.22 DIFERENCIA DE TIRANTE (18 MAYO 2017).....	78
TABLA A4.23 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (18 MAYO 2017).....	79
TABLA A4.24 RADIACIÓN SOLAR (18 MAYO 2017).....	80
TABLA A4.25 DIFERENCIA DE TIRANTE (19 MAYO 2017).....	81
TABLA A4.26 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (19 MAYO 2017).....	82
TABLA A4.27 RADIACIÓN SOLAR (19 MAYO 2017).....	83
TABLA A4.28 DIFERENCIA DE TIRANTE (22 MAYO 2017).....	84
TABLA A4.29 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (22 MAYO 2017).....	85
TABLA A4.30 RADIACIÓN SOLAR (22 MAYO 2017).....	86
TABLA A4.31 DIFERENCIA DE TIRANTE (23 MAYO 2017).....	87
TABLA A4.32 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (23 MAYO 2017).....	88
TABLA A4.33 RADIACIÓN SOLAR (23 MAYO 2017).....	89
TABLA A4.34 DIFERENCIA DE TIRANTE (24 MAYO 2017).....	90
TABLA A4.35 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (24 MAYO 2017).....	91
TABLA A4.36 RADIACIÓN SOLAR (24 MAYO 2017).....	92
TABLA A4.37 DIFERENCIA DE TIRANTE (25 MAYO 2017).....	93
TABLA A4.38 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (25 MAYO 2017).....	94
TABLA A4.39 RADIACIÓN SOLAR (25 MAYO 2017).....	95
TABLA A4.40 DIFERENCIA DE TIRANTE (26 MAYO 2017).....	96
TABLA A4.41 DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (26 MAYO 2017).....	97
TABLA A4.42 RADIACIÓN SOLAR (26 MAYO 2017).....	98

TABLA A5.1 PARÁMETROS PARA DETERMINAR EL CALOR ESPECÍFICO DEL AGUA SALADA.....	99
TABLA A5.2 IRRADIANCIA MENSUAL MES NOVIEMBRE DE 2013.....	100
TABLA A5.3 COEFICIENTE DE IRRADIANCIA MENSUAL.....	101
TABLA A5.4 EVALUACIÓN DEL ÁREA Y LA TEMPERATURA FINAL.....	101
TABLA A5.5 CONDICIONES CASETA Y MEDIO AMBIENTE.....	107

# ÍNDICE

## FIGURAS

FIGURA 2.1: CLASIFICACIÓN DE LOS DESTILADORES SOLARES .....	6
FIGURA 2.2: BALANCE DE ENERGÍA PARA UN DESTILADOR SOLAR DE DOS VERTIENTES .....	7
FIGURA 3.1: BANDEJAS DE ALUMINIO (IZQUIERDA) Y CASETA TIPO INVERNADERO (DERECHA). .....	14
FIGURA 3.2: LAYOUT DESTILADOR SOLAR ACTIVO ASISTIDO POR EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	15
FIGURA 3.3: VISTA FRONTAL, LATERAL Y PLANTA DE LA BASE PARA EL TANQUE. ....	16
FIGURA 3.4: VISTA DE LATERAL DE LA BASE (IZQUIERDA) Y VISTA CON EL TANQUE (DERECHA). .....	16
FIGURA 3.5: VISTA FRONTAL Y DETALLE 1 DEL COLECTOR SOLAR.....	18
FIGURA 3.6: GABINETE CON POLYFOAM Y FIBRA DE VIDRIO.....	19
FIGURA 3.7: ESTRUCTURA DE TUBOS Y LÁMINA DE COBRE SIN SOLDAR (IZQUIERDA) Y ESTRUCTURA YA SOLDADA (DERECHA). .....	20
FIGURA 3.8: DISEÑO DEL CABEZAL DE PVC.....	21
FIGURA 3.9: VISTA FRONTAL Y LATERAL DEL COLECTOR SOLAR Y SU CABEZAL DE PVC. ....	21
FIGURA 3.10: BASE Y COLECTOR SOLAR. ....	22
FIGURA 3.11: VÁLVULA TANQUE HACIA COLECTOR SOLAR. ....	23
FIGURA 3.12: CONEXIÓN MANGUERA DE 1/2" A CABEZAL DE 1/2". ....	23
FIGURA 3.13: CONEXIÓN CABEZAL 1/2" A VÁLVULA 1/4" CON LLEGADA A CASETA.....	24
FIGURA 3.14: DETALLE CONEXIÓN MANGUERAS.....	24
FIGURA 3.15: DETALLE DE CONEXIÓN DENTRO DE LA CASETA.....	25
FIGURA 3.16: MANGUERAS CON TELAS PAÑALINA. ....	25
FIGURA 3.17: SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE VAPOR.....	26
FIGURA 3.18: CODO CON REDUCCIÓN PARA EXTRACTOR. ....	27
FIGURA 3.19: EXTRACTOR DE LA CASETA (DERECHA) Y CELDA SOLAR (IZQUIERDA). ....	27
FIGURA 3.20: SALIDA DEL EXTRACTOR HACÍA EL SERPENTÍN. ....	28
FIGURA 4.1: PIRANÓMETRO.....	29
FIGURA 4.2: REGISTRADOR HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA. ....	30
FIGURA 4.3: DIFERENCIA DEL TIRANTE (10.00 - 17.00 HRS) FUERA DE LA CASETA. ....	30
FIGURA 4.4: DIFERENCIA DE TIRANTE EXTERNO E INTERNO. ....	32
FIGURA 4.5: DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (INTERNA – EXTERNA).....	34
FIGURA 4.6: RADIACIÓN SOLAR (W/M <sup>2</sup> ). ....	35

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda por los recursos naturales ha provocado que el ser humano busque alternativas para satisfacer sus necesidades básicas de agua, energía, alimentación. Realizando diferentes investigaciones y experimentos desde tiempos remotos ha logrado encontrar varias soluciones a estos problemas. Por ejemplo, en el caso de la escasez del agua, se han implementado diferentes sistemas para desalinizar el agua de mar. Estos sistemas se acoplan a las necesidades de la población de acuerdo a los recursos con los que cuenta, materiales a los que se tiene acceso, y tipo de energía que tiene a su disposición así como las características propias de su hábitat. La función básica de los destiladores solares es proveer de agua a los seres humanos mediante la imitación del ciclo natural del agua en una escala pequeña.

El presente trabajo de investigación se divide en siete capítulos y un apartado para anexos. El capítulo uno define los objetivos, alcances y limitaciones del proyecto, así como una breve introducción acerca del tema de estudio.

El capítulo dos habla sobre los orígenes de la destilación solar, su clasificación de acuerdo a las características de los mismos, las diferentes aplicaciones en los lugares donde se han puesto en marcha algunos proyectos y finalmente se explica mediante ecuaciones el balance de energía que rige estos sistemas.

El capítulo tres describe el procedimiento utilizado para el diseño del sistema, detallando paso a paso todo el proceso de construcción e instalación del mismo.

El capítulo cuatro describe el periodo de experimentación, haciendo mención sobre los parámetros que se midieron, las herramientas utilizadas como software y otros aparatos para obtener información detallada, concisa y oportuna para su posterior análisis.

Por otra parte, el capítulo cinco es la parte medular de este proyecto ya que en este apartado se hace un análisis profundo de los resultados para posteriormente compararlo con lo expuesto en la teoría.

Para finalizar el presente trabajo, el capítulo seis sintetiza los planteamientos realizados en los capítulos anteriores.

A partir de las conclusiones correspondiente al capítulo seis se proporciona en el capítulo siete una lista de recomendaciones dirigidas a mejorar estudios posteriores.

En la parte correspondiente a los anexos se incluye información para conocer más a fondo aspectos específicos del trabajo.

### **1.1. OBJETIVO**

Determinar el tirante óptimo de agua para mejorar el rendimiento de un destilador solar activo asistido por evapotranspiración.

### **1.2. ALCANCES / LIMITACIONES**

- El rendimiento para el prototipo del destilador solar activo asistido por evapotranspiración será evaluado con el apoyo de un modelo matemático.
- Solo se utilizará un modelo matemático de calentador solar, caseta y extractor de vapor.
- El sistema estará funcionando bajo las condiciones de la Ciudad de México.
- Determinar los costos totales en el diseño e instalación del destilador solar asistido por evapotranspiración.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

El agua es un elemento primordial para cualquier tipo de vida; sin ella es difícil concebir nuestra existencia. Por suerte para el ser humano y demás seres vivos, la Tierra está cubierta por este líquido: un volumen aproximado de 1,400 millones de kilómetros cúbicos equivale al 71% de la superficie terrestre. Sin embargo, en algunos lugares el acceso a esta se dificulta. La mayoría de los seres vivos dependen del consumo de agua dulce, sin embargo, el 97% de agua es salada y se encuentra en mares y océanos (CONAGUA 2014).

La escasez o la disminución de agua en muchos lugares, así como el detrimento de los ecosistemas de donde se obtiene, son indicios de un problema que en la actualidad, debido al aumento de la población y del consumo per cápita se muestra más claro. Por ello, conocer en qué se utiliza el agua es de gran ayuda al momento de encontrar las causas y posibles soluciones de estas dificultades (World Water Assesment Programme, 2003).

La desalinización del agua salina subterránea, agua salobre y agua de mar es una de las opciones que tiene el ser humano para contar con mayores recursos hídricos. La destilación de agua salada para obtener agua dulce ha sido aprovechada por diferentes civilizaciones durante muchos siglos (FAO 2006).

## 2. DESTILACIÓN SOLAR

Las Salinas, ubicado a 112 km de Antofagasta Chile, era un pueblo de servicio al cual llegaban semanalmente un promedio de ochocientas carretas arrastradas por mulas cargadas de minerales. Sus habitantes reclamaban agua potable para su consumo y el de sus animales. Adyacente a Las Salinas existía un terreno inclinado por donde brotaba agua salobre, y para convertirla en agua potable se instalaron ahí las llamadas condensadoras de agua, que habían permitido a los pueblos del litoral abastecerse de agua. Lamentablemente, el funcionamiento de las condensadoras era demasiado oneroso, puesto que funcionaban con carbón como combustible mineral que se adquiría en los yacimientos carboníferos del sur de Chile o del carbón importado de Inglaterra. El consumo de combustible y la obtención de agua potable, encarecía sustancialmente el valor final del agua en Las Salinas, y su precio llegaba a ser de cuatro centavos el galón.

En 1872, el ingeniero sueco Charles Wilson diseñó la primera planta de destilación solar de la que se tenga noticia para la empresa Salitrera Lastenia Salinas (sobre la cual después se construiría la oficina Chacabuco). Dicha planta era un instrumento destinado a convertir en potable el agua salada, usando para ello dos elementos que se encontraban en abundancia en el desierto de Atacama: el calor solar y la fuerza del viento. El sistema consistía en la instalación de arcas poco profundas llenas de agua salada, cubiertas por un techo inclinado de vidrio, en una extensión de 4,000 m<sup>2</sup>. El agua era elevada desde los pozos mediante una bomba de molino de viento hasta un estanque con capacidad para cuatro días. El sol calentaba el agua de las arcas por los rayos que pasaban a través de los vidrios. De esta manera, se producía humedad que se condensaba y era conducida a través de cañerías hasta un tanque que almacenaba el líquido potable. El destilador máquina llegó a producir en verano más de 20,000 litros de agua fresca diaria, y funcionó hasta 1907, año en que comenzaron a operar las primeras cañerías con agua de la Cordillera de los Andes (ONU 1972).

Otra innovación importante surgió en 1952 cuando el ejército de Estados Unidos utilizó un destilador solar portátil diseñado por María Telkes (Popular Mechanics Magazine, 1952) el cual ayudaba a los pilotos perdidos en el océano a subsistir hasta que fuesen rescatados. Este destilador portátil se componía de un globo inflable de plástico de 60 centímetros que flotaba en el océano, con un tubo flexible en un lado. Una bolsa separada servía de apoyo de la bolsa exterior. El agua de mar se introducía por una pequeña abertura en el fondo del globo. El agua dulce se extraía del tubo chupando del fondo del globo. En un buen día se podían extraer 2.4 litros de agua, mientras que en un día nublado se podían extraer hasta 1.4 litros (Popular Mechanics Magazine, 1952).

En México se adopta el uso de destiladores solares en los años de 1972 a 1976 con el apoyo de la oficina de aguas salinas de la Secretaria de Recursos Hidráulicos construyendo una gran cantidad de pequeños destiladores de caseta (0.8m<sup>2</sup> c/u) para varios lugares remotos, aunque estos solo se utilizaron algunos años debido a la falta de capacitación del personal para la comprensión de esta tecnología (Porta et al., 1998).

En 1980 se inaugura Sonntlán en las Barrancas, a 300 Km al norte de La Paz, Baja California Sur. Este proyecto utilizaba un destilador solar de múltiples etapas, para el cual el calor se suministró con un arreglo de concentradores solares de canal parabólico. Desafortunadamente el proyecto no tuvo éxito debido a la falta de operación y mantenimiento continuo especializado, así como la falta de interés en sustentar el proyecto por parte de la comunidad local y el gobierno federal (Covantes, 1989).

## 2.1. CLASIFICACION DE LOS DESTILADORES SOLARES

Los destiladores solares han sufrido varias modificaciones a su modelo tradicional (una vertiente) con el fin de adaptarse a las diferentes condiciones en las cuales se utiliza esta tecnología o en otros casos para mejorar el rendimiento de producción para agua potable. Estos sistemas se clasifican principalmente en sistemas activos y pasivos (K. Sampathkumar, *et.al.* 2010). Como se muestra en la figura 2.1, en los destiladores solares pasivos, el sol calienta directamente el



agua salina imitando el ciclo natural del agua. Mientras que los destiladores solares activos acoplan diferentes dispositivos con la finalidad de elevar la temperatura del agua salina utilizando una cantidad adicional de energía térmica, procedente de colectores solares o del calor desechado por motores y/o procesos industriales (Shukla, 2014).

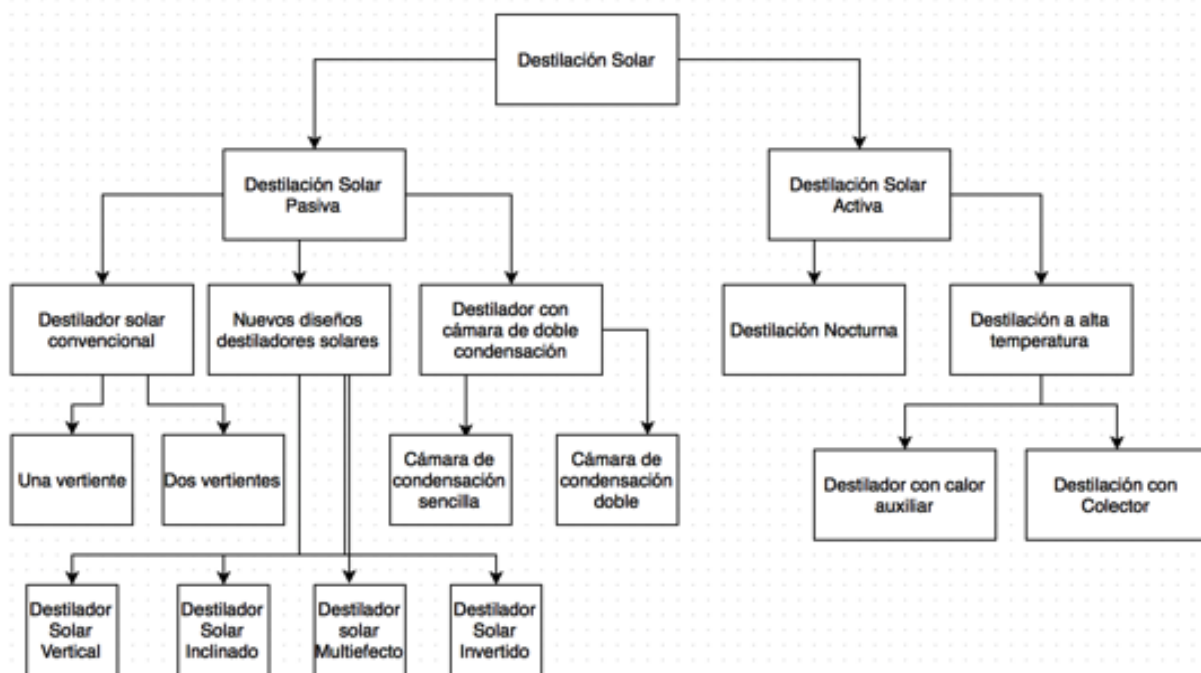


Figura 2.1: Clasificación de los destiladores solares (Shukla, 2014).

## 2.2. PRODUCTIVIDAD DE LOS DESTILADORES SOLARES

La productividad típica de los destiladores solares de caseta varía entre 3 y 5 litros diarios por metro cuadrado del destilador. Esta productividad depende, no solo del diseño, sino de los factores atmosféricos de los cuales los principales son: la irradiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad de los vientos. Una interpretación de estos fenómenos es que, a mayor irradiación se tiene mayor entrada de energía al colector y al evaporador, por lo cual se favorece la evaporación del destilando. Por otro lado, a menor temperatura ambiente y mayor velocidad del viento, se favorece la remoción de calor del condensador, con lo cual mejora la condensación. Las condiciones del evaporador y del condensador están

íntimamente ligadas entre sí por e intercambio térmico en el interior y hacia el exterior del destilador.

Por otra parte, respecto a la operación, es importante mencionar que la charola que funge como colector – evaporador nunca debe secarse, ya que cuando se seca se depositan algunas sales sobre la cubierta negra, estas se pueden calentar excesivamente alterándose la superficie, provocando que no funcione al 100%. El destilador debe purgarse periódicamente, pues la excesiva acumulación de sales en el evaporador disminuye la tendencia del destilando a evaporarse (Gudiño, 1995).

### 2.3. BALANCE DE ENERGÍA DE UN DESTILADOR SOLAR DE CASETA

El análisis para los destiladores solares de dos cubiertas cubre cuatro elementos esenciales (Rubio, 2003), estos se muestran en la figura 2.2 y corresponden a:

- a) la superficie absorbedora
- b) el agua
- c) dos superficies condensadoras

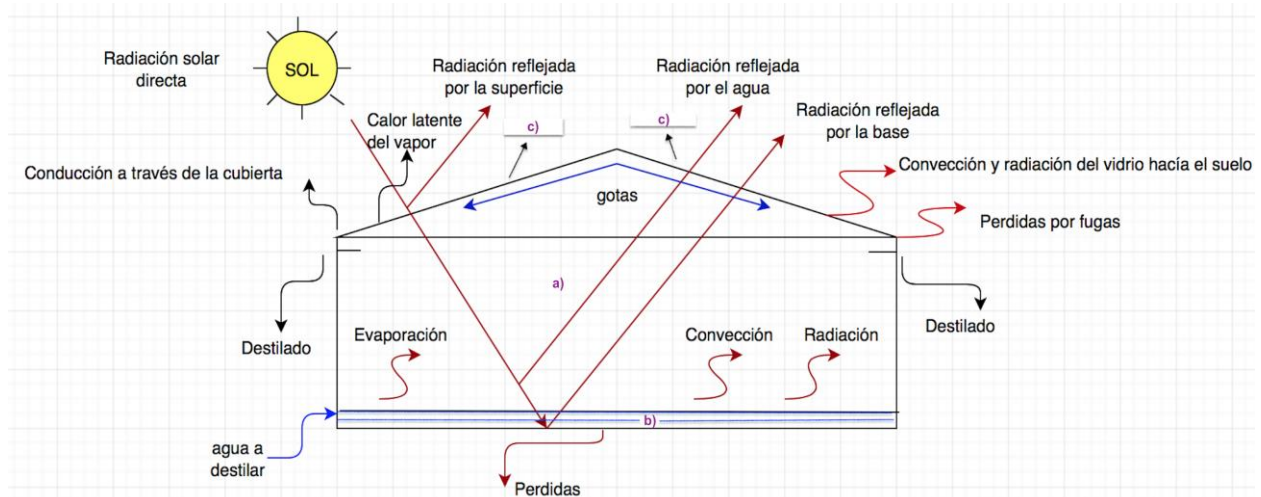


Figura 2.2: Balance de energía para un destilador solar de dos vertientes (Rubio, 2003).

A continuación, se muestran las ecuaciones para el balance de energía de los destiladores solares de caseta. De acuerdo con la figura 2.2 y tomando en consideración el principio de la conservación de la energía se tiene que:

*Energía que entra – Energía que sale = Energía que se almacena*

Partiendo de lo anterior se tiene que:

### 2.3.1. Balance de energía en la cubierta:

La ecuación 2.1 muestra los elementos involucrados en el balance de energía de la primera cubierta, la cual intercambia el calor con la segunda cubierta, el agua y los alrededores, se expresa:

$$C_{g1} \left( \frac{dT_{g1}}{dt} \right) = H_{g1}(t) + U_{wg1} (T_w - T_{g1}) - U_{g1g2} (T_{g1} - T_{g2}) - U_{g1e} (T_{g1} - T_e) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$C_{g1}$ : Capacidad calorífica de la cubierta 1 [J/m<sup>2</sup> K].

$H_{g1}$ : Radiación solar absorbida por la cubierta 1 [W/m<sup>2</sup>].

$U_{wg1}$ : Coeficiente global de transferencia de calor entre el agua y la cubierta 1 [W/m<sup>2</sup> K].

$T_w$ : Temperatura del agua [K].

$T_{g1}$ : Temperatura de la cubierta 1 [K].

$T_{g2}$ : Temperatura de la cubierta 2 [K].

$T_e$ : Temperatura del medio ambiente [K].

$U_{g1g2}$ : Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta 1 y la cubierta 2 [W/m<sup>2</sup> K].

$U_{g1e}$ : Coeficiente global de transferencia de calor entre el medio ambiente y la cubierta 1 [W/m<sup>2</sup> K].

### 2.3.2. Balance de energía para la segunda cubierta:

La ecuación 2.2 muestra el balance de energía para la segunda cubierta la cual intercambia calor con la primera cubierta, el agua y los alrededores, se expresa:

$$C_{g2} \left( \frac{dT_{g2}}{dt} \right) = H_{g2} + U_{wg2} (T_w - T_{g2}) - U_{g2g1} (T_{g2} - T_{g1}) - U_{g2e} (T_{g2} - T_e) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$C_{g2}$ : Capacidad calorífica de la cubierta 2 [J/m<sup>2</sup> K].

$H_{g2}$ : Radiación absorbida por la cubierta 2 [W/m<sup>2</sup>].

$U_{wg2}$ : Radiación absorbida por la cubierta 2 [W/m<sup>2</sup>].

$T_w$ : Temperatura del agua [K].

$T_{g1}$ : Temperatura de la cubierta 1 [K].

$T_{g2}$ : Temperatura de la cubierta 2 [K].

$T_e$ : Temperatura del medio ambiente [K].

$U_{g2g1}$ : Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta 1 y la cubierta 2 [W/m<sup>2</sup> K].

$U_{g2e}$ : Coeficiente global de transferencia de calor entre el medio ambiente y la cubierta 1 [W/m<sup>2</sup> K].

### 2.3.3. Balance de energía en el agua:

La ecuación 2.3 muestra el balance de energía del agua la cual intercambia calor con la primer cubierta, la segunda cubierta y la superficie de la bandeja con agua, se expresa:

$$C_w \left( \frac{dT_w}{dt} \right) = H_w + U_{wb}(T_b - T_w) - U_{wg1}(T_w - T_{g1}) - U_{wg2}(T_w - T_{g2}) \text{ (Ec. 2.3)}$$

$C_w$ : Capacidad calorífica del agua [J/m<sup>2</sup> K].

$H_w$ : Radiación absorbida por el agua [W/m<sup>2</sup>].

$U_{wb}$ : Radiación absorbida entre el agua y el fondo de la bandeja [W/m<sup>2</sup>].

$T_b$ : Temperatura del fondo de la bandeja [K].

$T_w$ : Temperatura del agua [K].

$T_{g1}$ : Temperatura de la cubierta 1 [K].

$T_{g2}$ : Temperatura de la cubierta 2 [K].

$U_{wg1}$ : Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta 1 y el agua [W/m<sup>2</sup> K].

$U_{wg2}$ : Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta 2 y el agua [W/m<sup>2</sup> K].

### 2.3.4. Balance de energía en la bandeja:

La ecuación 2.4 muestra el balance de energía de la bandeja, la cual representa la principal fuente de energía del sistema, se expresa:

$$C_b \left( \frac{dT_b}{dt} \right) = H_b - U_{bw}(T_b - T_w) - U_{be}(T_b - T_e) \text{ (Ec. 2.4)}$$

$C_b$ : Capacidad calorífica de la bandeja [ $J/m^2 K$ ].

$H_b$ : Radiación absorbida por la bandeja [ $W/m^2$ ].

$U_{bw}$ : Radiación absorbida entre el agua y el fondo de la bandeja [ $W/m^2$ ].

$U_{be}$ : Radiación absorbida entre la bandeja y el medio ambiente [ $W/m^2$ ].

$T_b$ : Temperatura de la bandeja [K].

$T_w$ : Temperatura del agua [K].

$T_e$ : Temperatura del medio ambiente [K].

### 2.3.5. Calor perdido por convección natural:

La ecuación de Dunkle (Ec. 2.5) se utiliza para analizar el proceso de evaporación-condensación dentro del sistema, se expresa:

$$hc = 0.884 \left( T_w - T_g + \frac{P_w - P_g}{268.9 \times 10^3 - P_w} T_w \right)^{\frac{1}{3}} \text{ (Ec. 2.5)}$$

$hc$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección natural [ $W/m^2 K$ ].

$P_w$ : Presión de vapor del agua a la temperatura del agua [Pa].

$P_{wg}$ : Presión de vapor del agua a la temperatura del vidrio [Pa].

$T_w$ : Temperatura del agua [K].

$T_g$ : Temperatura del vidrio [K].

## 2.4. APLICACIONES DESTILADORES SOLARES ACTIVOS

Algunos modelos de destiladores que a continuación se presentan han sido implementados en lugares donde las condiciones son las apropiadas para su funcionamiento.

Debido a la presencia de microorganismos en el sistema de aguas de Ammán, la Facultad de Ingeniería Tecnológica Aplicada de Al-Balqa de la Universidad en Ammán, Jordán, en el año 2005 construyó un destilador solar de una pendiente que al ponerlo en funcionamiento reflejó una productividad diaria de 2.2 litros de agua destilada, y debido a la exigencia de aumentar la producción decidieron acoplar un colector solar al diseño principal que permite calentar el agua antes de ingresar a ser destilada gracias a la energía solar, aumentando así la

productividad en un 36%, recibiendo diariamente 3.5 litros diarios de agua destilada (Badran, 2005).

- a) La mala calidad del agua y la sobreexplotación de los acuíferos en la Ciudad de México fomentaron la construcción de un destilador solar de una pendiente para abastecer a la comunidad universitaria en los años de 1988-1990 contando con el apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este destilador contaba con una producción de agua destilada de 4.5 litros/m<sup>2</sup> día. Para mejorar la productividad del sistema se decidió agregarle al diseño un colector solar el cual calentaba el agua para posteriormente bombearla hacía los destiladores solares, con este sistema se obtuvo un promedio de 24 litros/m<sup>2</sup> día, sin embargo el costo del colector solar fue muy elevado en comparación con el modelo original, lo cual provoco desinterés en la comunidad universitaria (Fernández, 1990).
- b) En el Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur, en La Paz, se experimentó con destiladores solares de canal largo los cuales consisten en utilizar un canal con una pequeña pendiente para evitar el estancamiento del agua a destilar, está expuesto al aire solamente el área de condensación. Al fluir el agua a destilar se perturba la capa límite en la interfaz agua-aire, favoreciendo la difusión del vapor. Si se cuida que no exceda una altura máxima de la cubierta de 40 cm, puede aspirarse a una producción de 4 litros/m<sup>2</sup> por día, la que en condiciones adecuadas de flujo longitudinal puede aumentar hasta un 10%. En un destilador de 2.2 m<sup>2</sup>, sin flujo longitudinal, se obtiene una producción máxima de 4.2 litros/m<sup>2</sup> día cuando el tirante medio de la salmuera es del orden de 1cm y la radiación solar máxima es de 950 W/m<sup>2</sup>. Esta producción se reduce hasta un 10% en días en que la temperatura aumenta encima de los 32°C o la velocidad del viento baja de 1m/s (Fernández, 1990).
- c) El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería en la India en los años 2007 y 2008 implementó un destilador solar para mejorar la

calidad de agua en el lugar, aprovechando la radiación de  $500 \text{ W/m}^2$  en promedio, diseñó y construyó un destilador solar de una vertiente, el cual es alimentado por un tanque de agua a destilar. Este modelo dio como resultados  $1.88 \text{ litros/m}^2$  (Velmurugan, 2008).

- d) El departamento de Ingeniería de la Universidad de Trujillo en Venezuela analizó el costo de operación de un destilador solar para la comunidad Quebrada de Ramos perteneciente al estado de Trujillo. Se construyó un destilador de agua solar con  $0.15 \text{ m}^2$  de área de captación. La producción del destilador fue de  $0.112 \text{ m}^3/\text{año}$  y de  $0.369 \text{ m}^3/\text{año}$ , para los periodos húmedo y seco respectivamente. El área de colección consiste en una bandeja plana de latón, pintada de negro mate, que además constituye el envase que almacena el agua a destilar, confinada en el interior de una caja cuadrada de pared de vidrio transparente, de manera que permite la entrada de luz solar y sirve como aislante al calor que se acumula en el interior. La cubierta del destilador está constituida por una lámina de vidrio transparente, con una pendiente de  $24^\circ$ , en las paredes internas en la parte inferior se colocaron canales para la conducción del agua destilada. Para sostener el colector se construyó una base de madera. Tanto la pared posterior de madera, la bandeja de latón y la superficie de la base de madera se pintaron de negro mate. El agua sin tratamiento, se coloca en la bandeja, por acción del calor se evapora para luego condensarse en la cubierta del colector. El agua condensada escurre debido a la pendiente y cae en los canales colectores para finalmente recogerla en un envase en la parte exterior del destilador (Chinappi, 2007). En la tabla del anexo A1.1 se muestra un análisis de diferentes modelos de destiladores solares que han sido probados en otras regiones, enfatizando sus pros y contras.



### 3. METODOLOGÍA

La caseta construida para evaluar la influencia de un sistema de intensificación de la evaporación, como estímulo a la destilación solar, se localiza en el edificio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en la Ciudad de México, con latitud  $19^{\circ}38'49''$ , longitud  $101^{\circ}13'43''$ , y altitud 1,960 metros sobre el nivel del mar. Las pruebas experimentales que fueron la base de la investigación de la doctora Ana Elisa Silva (2006) se llevaron a cabo en una caseta tipo invernadero como se muestra en la figura 3.1 (derecha) con las siguientes características:

- Largo 2.4 m
- Ancho 2.2 m
- Altura de la pared vertical 1.5 m
- Altura del vértice de techo 2.2 m
- Ángulo de escurrimiento  $30^{\circ}$

La caseta cuenta con cuatro bandejas de aluminio de 1.5 m de largo por 0.25 m de ancho y una profundidad de 0.04 m cubiertas con poliuretano negro que hacen la función de colector solar plano, como se muestra en la figura 3.1 (izquierda). Esta caseta fue rehabilitada y modificada como se anota enseguida para los efectos de la investigación que se reporta en esta tesis.



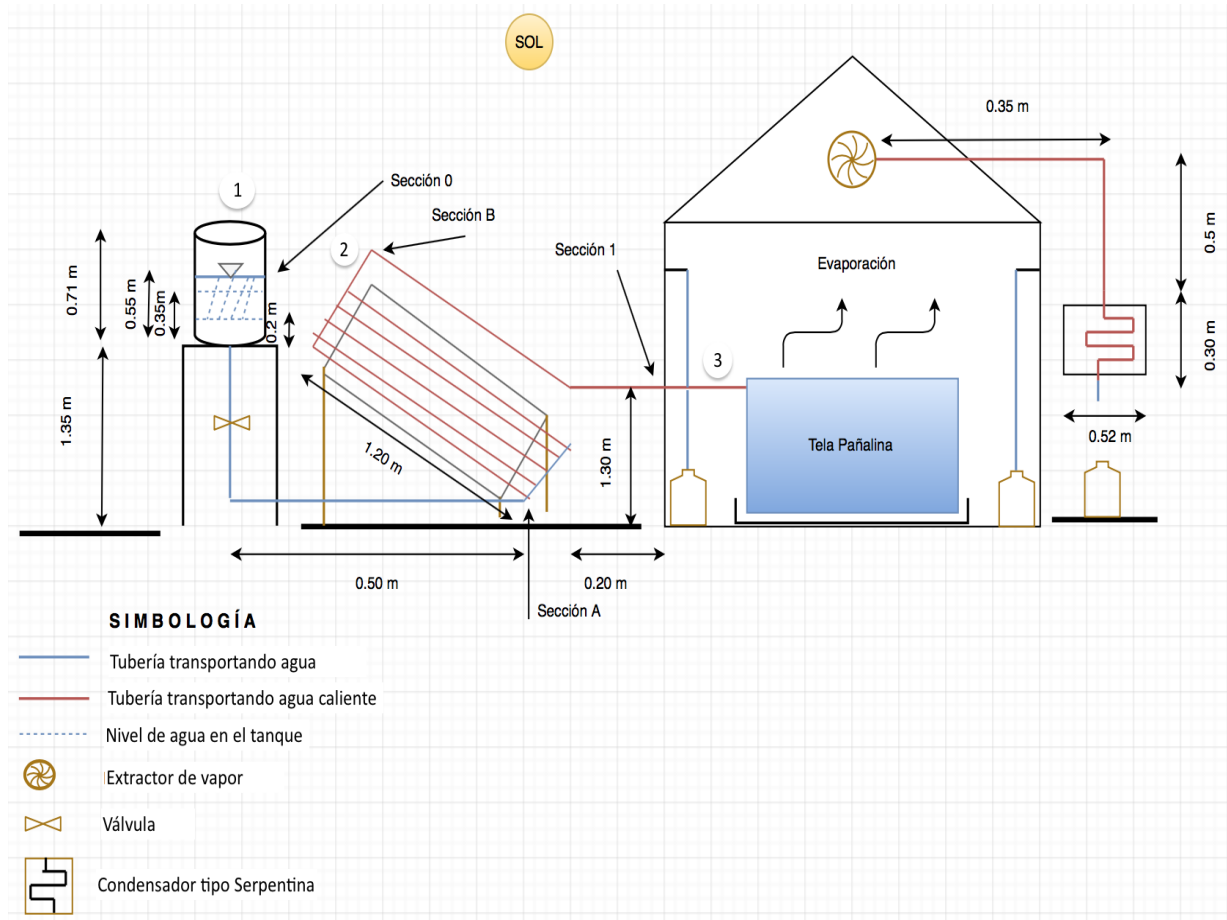


Figura 3.1: Bandejas de aluminio (izquierda) y caseta tipo invernadero (derecha).

### 3.1. Diseño del sistema de alimentación de agua

En la figura 3.2 se presenta el sistema de alimentación de agua, este se divide en tres partes:

- 1) Base para el recipiente de agua salada con una capacidad de 90 litros.
- 2) Colector solar plano
- 3) Líneas de conducción



**Figura 3.2: Layout destilador solar activo asistido por evapotranspiración (Elaboración propia, 2017).**

El agua a destilar se coloca en el tanque, esta se libera mediante la apertura de la válvula para controlar el flujo de salida, el agua pasa a través del colector solar plano para dirigirse hacia las cuatro líneas de conducción de agua dentro de la caseta, las cuales son las encargadas de distribuir el flujo de 60 litros. Este sistema se maneja manualmente y no cuenta con un sistema de recirculación del agua sobrante.

### 3.1.1. Base para el tanque con agua

Partiendo de las dimensiones del tanque, se diseñó un banco de estructura metálica hecha con varilla de  $\frac{1}{4}$ " con anclas en sus cuatro patas para fijarse al piso, cuenta con un barandal para sujetar el tanque con las siguientes dimensiones: 1.60 m de altura y una base de 0.50 x 0.50 m, el diseño final del

banco se muestra en la figura 3.3 y el banco terminado se muestra en la figura 3.4.

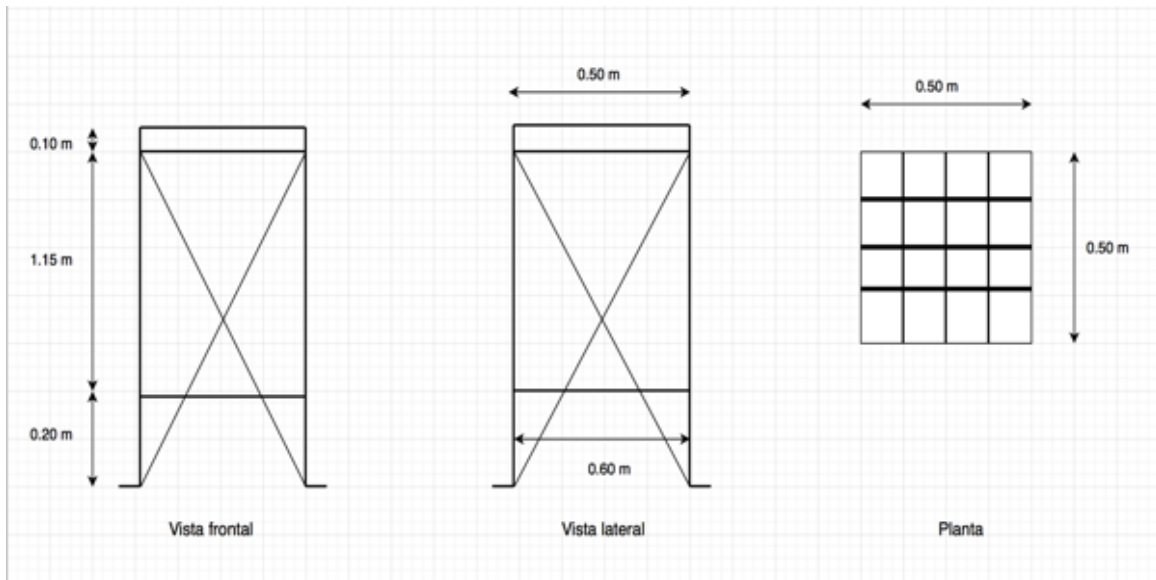


Figura 3.3: Vista frontal, lateral y planta de la base para el tanque (Elaboración propia, 2017).



Figura 3.4: Vista de lateral de la base (izquierda) y vista con el tanque (derecha).

### 3.1.2. Colector solar plano

Para poder determinar el área de un colector solar plano se debe conocer la irradiancia del lugar donde se va a colocar el colector, el calor específico de la sustancia, que en nuestro caso es agua salada, así como la eficiencia del colector solar plano; en este modelo se utilizó una eficiencia de 50%. Una vez que se conocen esos valores se determinó que el área óptima es de  $1 \times 1 \text{ m}^2$ . Los cálculos sobre el diseño del colector solar plano se encuentran en el anexo 5.

El principal propósito de un colector solar es captar la mayor cantidad de energía al menor costo total posible. Esto implica que el colector debería tener una vida útil larga, soportar los efectos de la radiación ultravioleta, la corrosión y las incrustaciones, sin verse afectado por las condiciones climáticas adversas como una granizada, vientos extremos, lluvias, entre otros. (Kalogirou, 2004).

Con el objetivo de lograr un colector competitivo se establece que los materiales empleados sean de fácil acceso para cualquier persona y que su costo no sea muy elevado. Este detalle se aprecia en el anexo 3.

El gabinete para el colector es fabricado con chapa de acero galvanizada calibre 26, ya que es económica, ligera y tiene una durabilidad aceptable a la intemperie con dimensiones de  $1 \times 1 \text{ m}^2$ , el layout del gabinete se muestra en la figura 3.5.

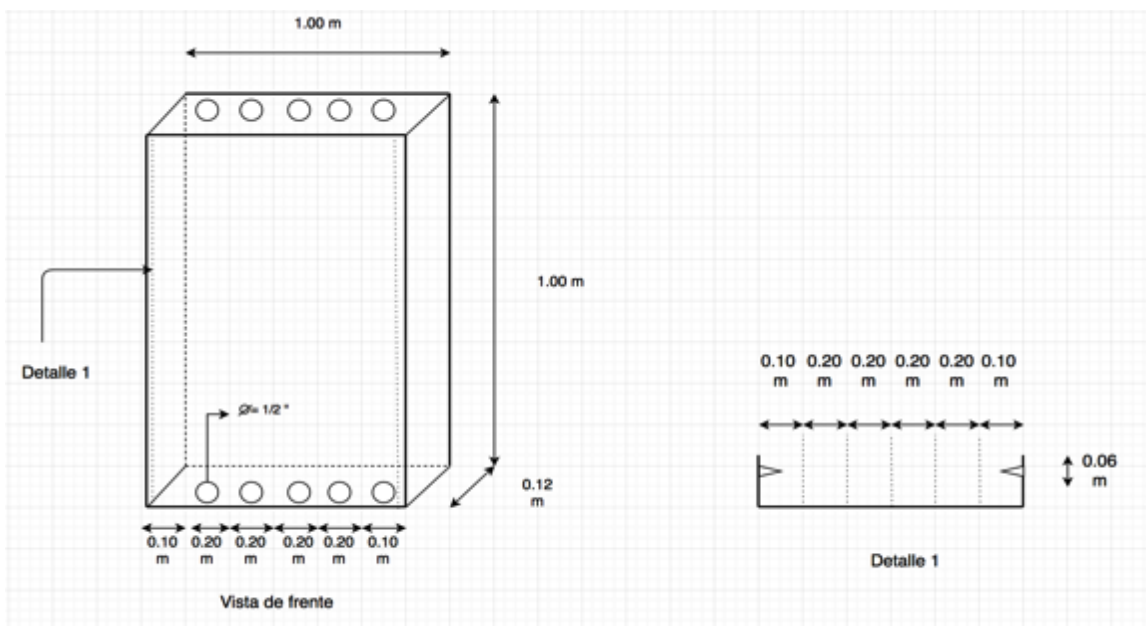


Figura 3.5: Vista frontal y detalle 1 del colector solar (Elaboración propia, 2017).

El gabinete lleva una pestaña para colocar la tapa del colector solar plano, como se muestra en el detalle 1 correspondiente a la figura 3.5, en ambos extremos se hicieron 5 orificios de 13 mm ya que por esos orificios se colocarán los tubos de cobre por donde circulará el agua con sal. Para darle un adecuado mantenimiento al colector solar se diseñó el gabinete con una pestaña que abre y cierra.

El interior del gabinete se forró con polyfoam transparente de 6.6 mm de espesor, el cual es adherido con silicón; la función principal del polyfoam es mantener hermético el gabinete. Una vez adherido el polyfoam, encima de este se colocó el aislante. En este caso se utiliza fibra de vidrio de 25.4 mm de espesor, este material mejora la eficiencia térmica del sistema, minimizando las pérdidas de energía como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6: Gabinete con polyfoam y fibra de vidrio.**

Los tubos que lleva el colector solar plano son de cobre con un diámetro de 13 mm, como se muestra en la figura 3.7 (izquierda). Se eligió el cobre ya que es un material de alta conductividad térmica, es resistente a la intemperie y posee alta resistencia a la corrosión. Para que el colector solar absorba una mayor cantidad de calor es recomendable colocarles a los tubos unas “aletas” procurando que sean del mismo material del tubo. Estas deberán troquelarse en forma de “U” para que el tubo pase por en medio de estas como se muestra en la figura 3.7 (derecha)





**Figura 3.7: Estructura de tubos y lámina de cobre sin soldar (izquierda) y estructura ya soldada (derecha).**

Para las aletas se escogió lámina de cobre calibre 28 (ya que es fácil de troquelar), y para soldar los tubos con la aleta se utilizó soldadura 50-50 (plomo-estaño). Una vez soldados los tubos con la placa se pinta el lado expuesto a la radiación solar con pintura negro mate en spray resistente a temperaturas altas.

Debido a que el líquido a destilar es altamente corrosivo y puede llegar a generar incrustaciones en las tuberías se eligió armar los cabezales con PVC cédula 40, el layout del cabezal se muestra en la figura 3.8. Estos cabezales constan de 5 “Tee” por lado. Estas “Tee” se unen con el tubo y se pegan utilizando pegamento para PVC. Para evitar fugas se cubrió con cinta teflón las uniones de las “Tee” con los tubos. Al final de cada uno de los cabezales se colocó un tapón con la finalidad de removerlo cada que se desee dar mantenimiento a las tuberías, gracias a esto se prolonga la vida útil del colector solar, esto se muestra en la figura 3.9.

Finalmente, para la cubierta se selecciona policarbonato transparente alveolar de 6 mm, el cual debido a su flexibilidad se puede manipular de diferentes formas. Una de sus ventajas es que es un material de bajo peso comparado con el vidrio y una de sus caras tiene protección UV.

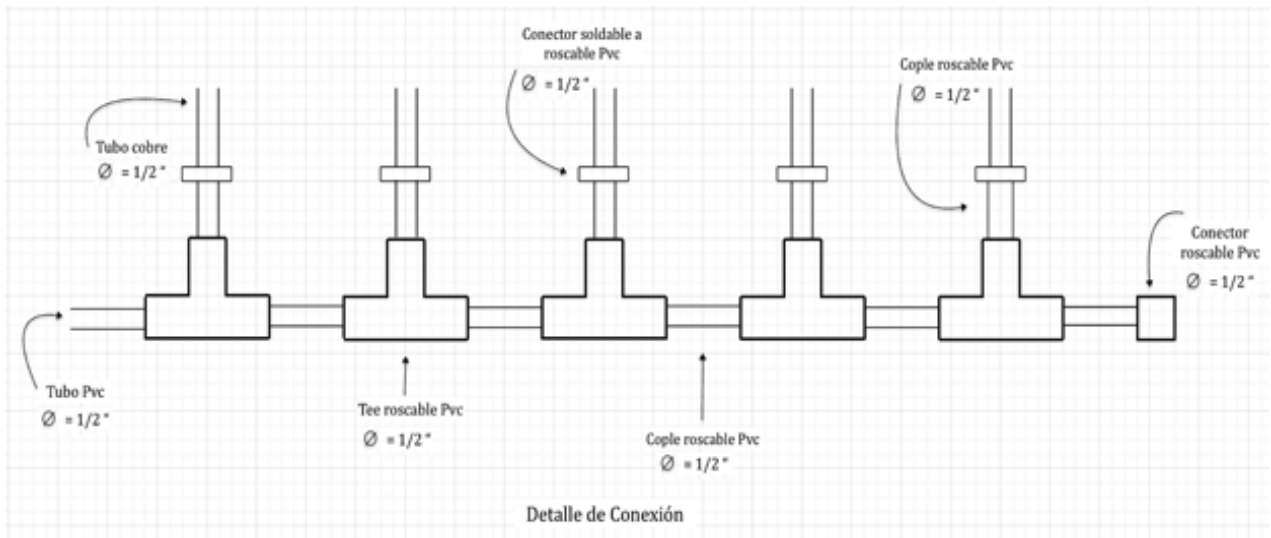


Figura 3.8: Diseño del cabezal de PVC (Elaboración propia, 2017).



Figura 3.9: Vista frontal y lateral del colector solar y su cabezal de PVC.

Los colectores solares en el hemisferio norte están orientados hacia el sur e inclinados con la latitud que corresponde de acuerdo a su ubicación. En el caso de



La Cd. de México se encuentra inclinado a  $19^\circ$  con respecto a la horizontal. Para darle esta inclinación se diseñó una base con poste tipo ángulo calibre 14 el cual facilita la colocación del colector solar con la inclinación adecuada como se muestra en la figura 3.10.

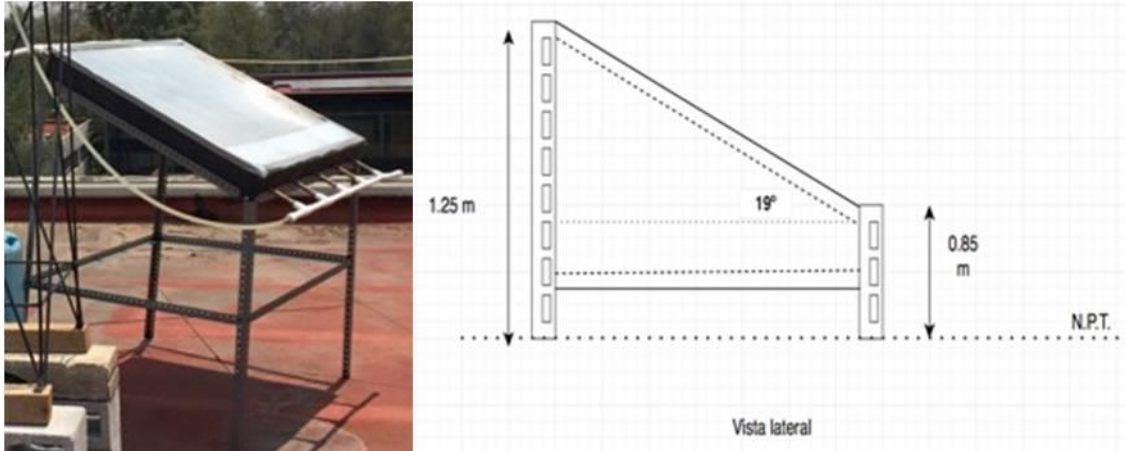


Figura 3.10: Base y colector solar (Elaboración propia, 2017).

### 3.1.3. Líneas de conducción

Debido a que el gasto es muy pequeño se buscó el mejor material para satisfacer la velocidad promedio en tuberías que está en el rango de 1 a 2.5 m/s, (Mott, 1996) encontrando la manguera de hule como el material que mejor se ajusta a los requerimientos del proyecto. En este caso se hizo a un lado la tubería de PVC y la tubería de cobre, ya que en el caso del PVC no existen diámetros menores a  $\frac{1}{2}$  ", en el caso de la tubería de cobre sí hay diámetros menores a  $\frac{1}{4}$  "pero se corre el peligro que se tapen debido a que el contenido del líquido es agua con sal. Para la salida del tanque hacía el colector solar, se diseñó el siguiente sistema de alimentación el cual consta de:

- Válvula de  $\frac{1}{2}$ " que conecta al tanque de agua con el colector solar, utilizando manguera del mismo calibre que la válvula. Se hizo un orificio en la base del tanque donde se colocó la válvula y se cubrió alrededor de ella con plastilina epóxica para evitar fugas como se muestra en la figura 3.11.



**Figura 3.11: Válvula tanque hacia colector solar.**

- b) Esta manguera se conecta al cabezal inferior del colector solar, el agua sube por los tubos de cobre donde se calienta, para luego dirigirse hacia la caseta, como se muestra en la figura 3.12.



**Figura 3.12: Conexión Manguera de 1/2" a cabezal de 1/2".**

- c) Una vez que el agua llega al cabezal superior, este se conecta a la caseta a través de una válvula de 1/4", como se muestra en la figura 3.13.



**Figura 3.13: Conexión cabezal ½" a válvula ¼" con llegada a caseta.**

- d) Finalmente, esta manguera de ¼" distribuye el agua con sal a las cuatro bandejas. Para la distribución del agua a cada una de las bandejas se utiliza manguera de ¼" con una longitud de 1.50 m por bandeja. Estas mangueras se perforaron cada 20 cm, con el fin de crear un sistema de riego por goteo. Las mangueras están conectadas entre si con "tees" de ¼" y un codo de ¼" al final de la última manguera, como se muestra en la figura 3.14.



**Figura 3.14: Detalle conexión mangueras.**

En el extremo final de cada una de las mangueras se colocó un codo de ¼" el cual se conecta con la siguiente manguera esto con el fin de hacer un circuito por pares



para la distribución del agua en las bandejas, como se muestra en la figura 3.15. Finalmente en la figura 3.16 se muestra como quedan las telas pañalina colocadas sobre las mangueras de agua, listas para experimentar.

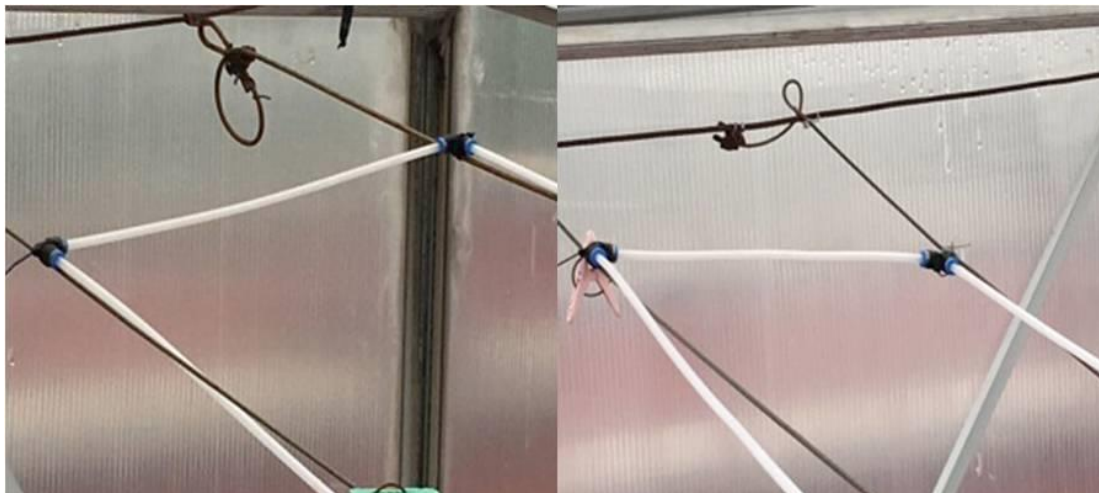


Figura 3.15: Detalle de conexión dentro de la caseta.



Figura 3.16: Mangueras con telas pañalina<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> paño de algodón de máxima absorción.

### 3.2. Sistema de extracción de vapor

Con la finalidad de obtener una mayor cantidad de agua destilada, se propuso el diseño de un sistema de extracción de vapor externo. Este sistema consta de un ventilador el cual dirigirá el vapor a través de un ducto que se conecta a un condensador tipo serpiente. Este sistema de extracción se alimenta a través de una celda solar colocada en el techo de la caseta. El layout se muestra en la figura 3.17.

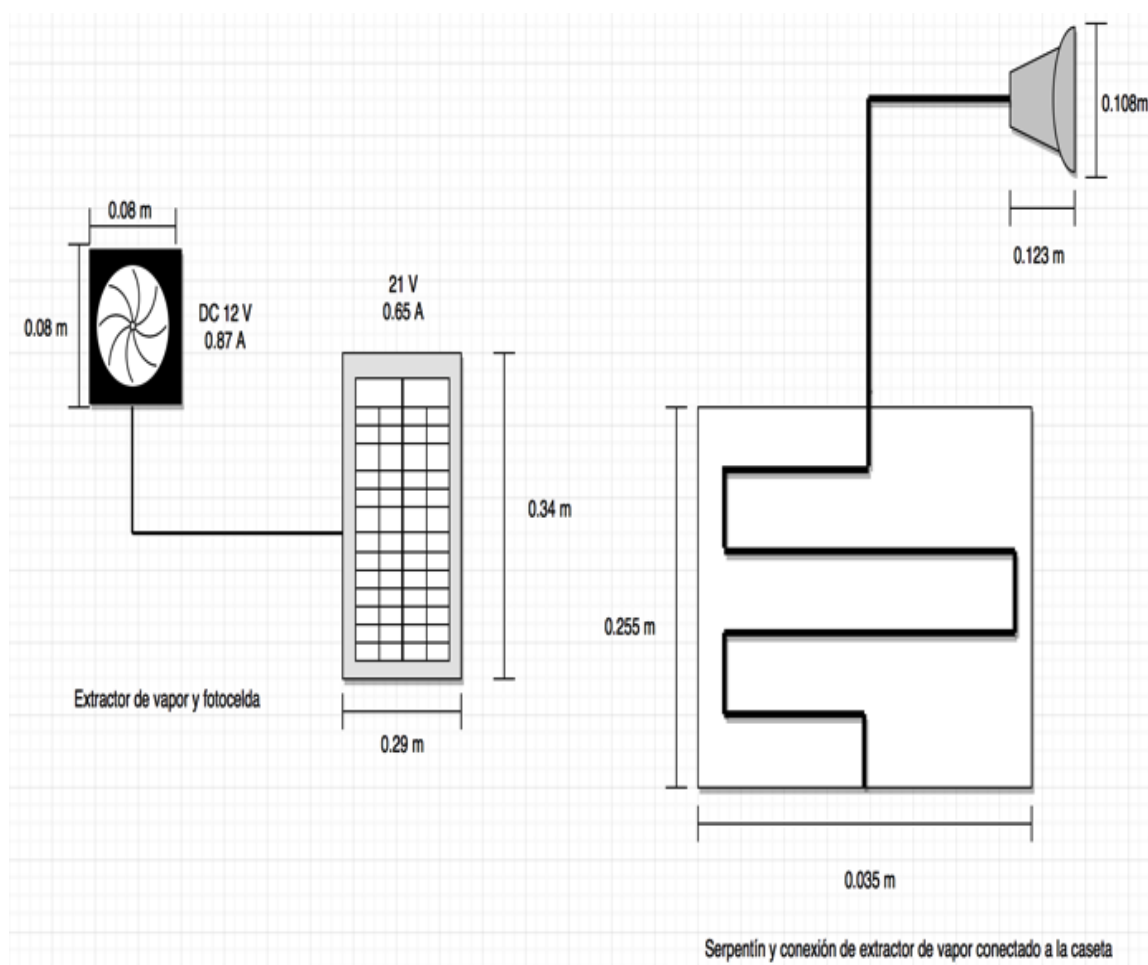


Figura 3.17: Sistema de extracción de vapor (Elaboración propia, 2017).

Para la instalación del ventilador se utilizó un codo de PVC con las siguientes dimensiones: 0.123 m de largo x 0.106 m de ancho. Debido a sus características se tuvo que perforar el codo para conectar el extractor con la celda y también para

detener el extractor dentro del codo, y para evitar fugas se cubrieron los orificios con silicón, este detalle se muestra en la figura 3.18.



Figura 3.18: Codo con reducción para extractor (Elaboración propia, 2017).

En la pared opuesta a la puerta de la caseta se localiza el extractor, como se muestra en la figura 3.19 (derecha), a los conectores del extractor se les coloca un pedazo de manguera con el fin de que no se oxiden debido a la humedad. Por otro lado, la celda solar se coloca en el techo de la caseta y se fija con cinta plateada como se muestra en la figura 3.19 (izquierda).



Figura 3.19: Extractor de la caseta (derecha) y Celda solar (izquierda).

El extractor está conectado a través de un ducto de PVC que se encuentra por fuera de la caseta como se muestra en la figura 3.20. Este ducto está unido a una manguera en forma de serpentín que se encuentra dentro de una hielera, esta hielera cubre con agua la manguera. Adicionalmente al agua se colocan bolsas de gel refrigerante congeladas, para mantener el agua a una temperatura baja que ayude a condensar más rápido el vapor que se extrae en agua destilada.



Figura 3.20: Salida del extractor hacia el serpentín.

## 4. EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se realizó del 3 al 26 de mayo de 2017, durante la esta etapa se midieron diferentes parámetros como el tirante de agua de las charolas, la temperatura, la humedad relativa (fuera y dentro de la caseta) así como la radiación solar. Para las mediciones para temperatura y humedad relativa se utilizaron dos registradores de datos modelo HOBO UX-100-003, como se ve en la figura 4.2, para medir la radiación solar un piranómetro modelo HOBO micro station H21-002, como se muestra en la figura 4.1. Finalmente para medir el tirante de agua se utilizó una cinta métrica la cual se indica en la figura 4.3. Los datos presentados corresponden al día 17 de mayo de 2017. El resto del periodo experimental se muestra en el anexo 4 de este documento.



**Figura 4.1: Piranómetro.**





**Figura 4.2: Registrador Humedad Relativa y Temperatura.**

Las mediciones experimentales iniciaron a las 10.00 am para finalizar a las 17.00 hrs, llevándose un registro de datos cada media hora. Se colocó un registrador de datos dentro de la caseta y otro afuera de esta con la finalidad de obtener información. La figura 4.3 indica la diferencia del tirante a lo largo del día.



**Figura 4.3: Diferencia del tirante (10.00 - 17.00 hrs) fuera de la caseta.**

Diariamente se recopilaban los datos para posteriormente analizarse y clasificarse en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 en Excel:

a) La tabla 4.1 muestra los datos medidos para el tirante externo e interno:

**Tabla 4.1: Análisis tirante externo e interno (17 mayo 2017)**

<b>Hora</b>	<b>Tirante interno (cm)</b>	<b>Tirante externo (cm)</b>
<b>10:00</b>	3	3
<b>10:30</b>	3	3
<b>11:00</b>	3	3
<b>11:30</b>	3	3
<b>12:00</b>	3	3
<b>12:30</b>	3	2.9
<b>13:00</b>	2.9	2.9
<b>13:30</b>	2.9	2.8
<b>14:00</b>	2.9	2.8
<b>14:30</b>	2.8	2.8
<b>15:00</b>	2.8	2.7
<b>15:30</b>	2.8	2.7
<b>16:00</b>	2.7	2.6
<b>16:30</b>	2.7	2.6
<b>17:00</b>	2.7	2.6

Una vez capturados los datos correspondientes al tirante de agua, se grafican como aparece en la figura 4.4, se hace un análisis de regresión para conocer la relación que existe entre estas variables, se obtiene la línea de tendencia, que en este caso es lineal, la cual representa la disminución del tirante de agua a un ritmo constante en el tiempo.

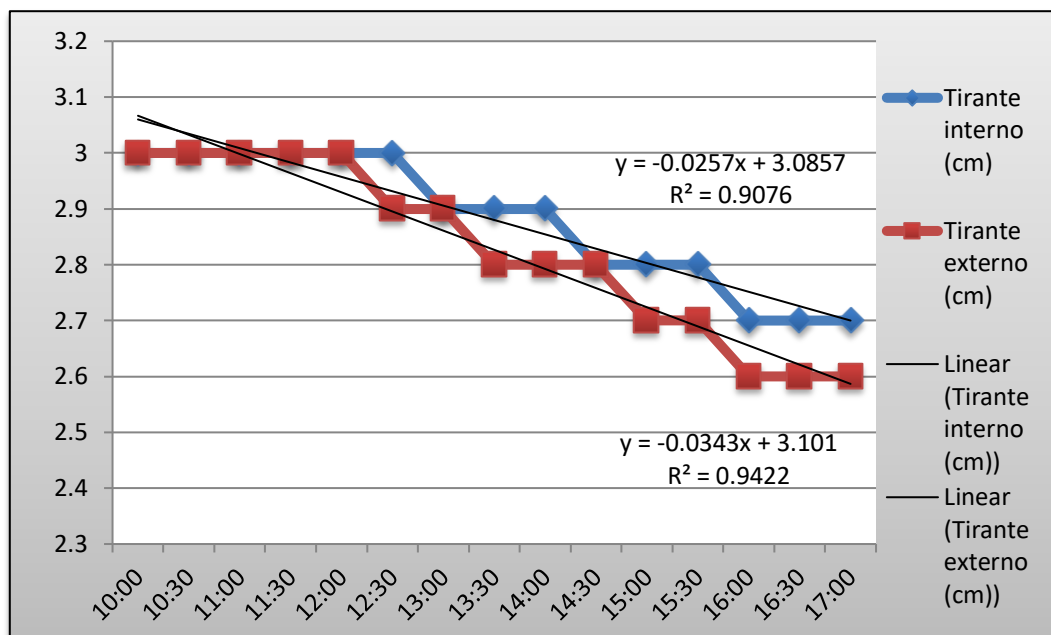


Figura 4.4: Diferencia de tirante externo e interno (17 mayo 2017)

b) Los datos pertenecientes a Humedad Relativa, Temperatura y Radición Solar se descargaron mediante el uso del software HOBOWare, posteriormente estos datos se transfieren a Excel obteniéndose las gráficas para cada uno de los parámetros. La tabla 4.2 muestra los parametros referentes a temperatura interna, temperatura externa, humedad relativa interna y humedad relativa externa.

**Tabla 4.2: Datos Diferencia de temperatura y Humedad Relativa (interna – externa).**

<b>Hora</b>	<b>Temperatura interna (°C)</b>	<b>RH interna %</b>	<b>Temperatura externa (°C)</b>	<b>RH externa %</b>
<b>10:00</b>	37.6	24.413	29.065	33.39
<b>10:30</b>	48.02	15	31.791	28.249
<b>11:00</b>	52.579	15	34.281	24.739
<b>11:30</b>	53.199	15	37.7	19.706
<b>12:00</b>	54.24	15	39.658	16.855
<b>12:30</b>	59.637	15	41.795	14.698
<b>13:00</b>	56.162	15	41.473	15.561
<b>13:30</b>	62.323	15	38.868	16.996
<b>14:00</b>	61.245	15	39.573	16.125
<b>14:30</b>	57.884	24.166	35.823	19.17
<b>15:00</b>	60.936	22.922	36.2	18.332
<b>15:30</b>	61.916	15	35.689	18.519
<b>16:00</b>	64.377	15	44.781	11.874
<b>16:30</b>	55.422	15	43.435	12.34
<b>17:00</b>	39.555	37.362	34.545	24.477

Posteriormente estos datos se grafican, como se muestra en la figura 4.5. En esta gráfica se observa que las variaciones entre la temperatura interna y externa son parecidas, cuando la temperatura en el exterior aumenta lo mismo sucede con la temperatura dentro de la caseta y cuando se presenta alguna disminución en la temperatura externa, la temperatura interna disminuye. Los valores registrados para Humedad relativa (HR) se mantuvieron a un ritmo constante, tanto dentro de la caseta como fuera de ella.

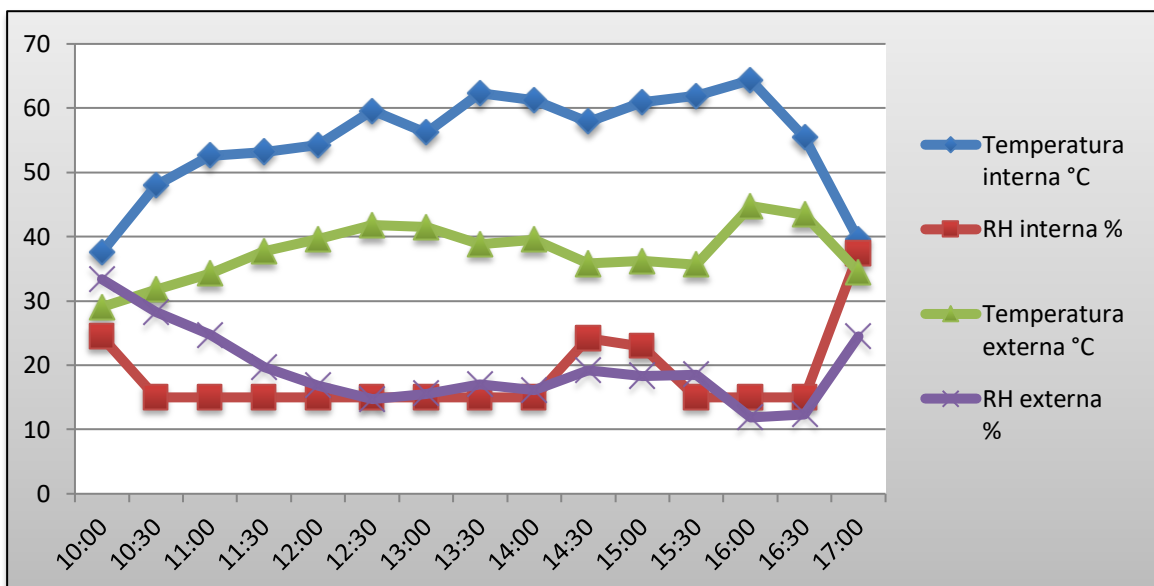


Figura 4.5: Diferencia de temperatura y Humedad Relativa (interna – externa).

c) Finalmente, en la tabla 4.3 se indican los valores registrados de la Radiación Solar:

Tabla 4.3: Medición de la Radiación Solar (17 mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	575.6
10:30	650.6
11:00	733.1
11:30	789.4
12:00	925.6
12:30	966.9
13:00	363.1
13:30	964.4
14:00	1,016.90
14:30	959.4
15:00	923.1
15:30	855.6
16:00	741.9
16:30	295.6
17:00	80.6

La figura 4.6 corresponde a la radiación solar registrada para el día 17 de mayo de 2017. Se logra apreciar una disminución a las 13.00 h, esto debido a la presencia de alguna nube, el valor más alto registrado fue de 1,016.90 W/m<sup>2</sup>.

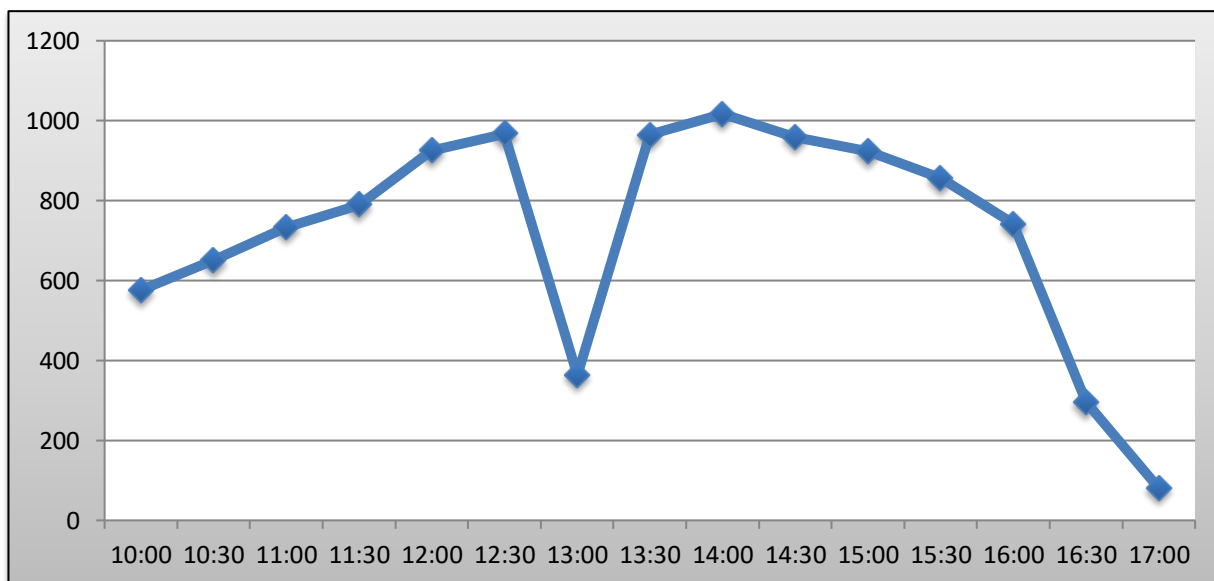


Figura 4.6: Radiación Solar (W/m<sup>2</sup>)

Una vez que se tienen todos los parámetros capturados, se analizan los resultados con el software de programación Just Basic. El algoritmo de programación utilizado se incluye en el anexo 2 de este documento.

## 5. RESULTADOS

En este apartado se elabora una comparación entre los resultados experimentales de la evaporación de agua desde charolas similares a las que se emplean en destiladores solares, y los resultados que para esa aplicación se obtienen de la literatura. Con esa comparación se pretende validar, por un lado, el enfoque de la simulación numérica como herramienta para el diseño de destiladores solares directos, con y sin calentamiento auxiliar, y por otro, la importante propuesta de los profesores Vega y Silva de la UNAM, de desacoplar el fenómeno de evaporación desde la base del destilador hasta la cubierta transparente, para incrementar la superficie evaporadora (como se obtiene si en el interior del destilador se plantan vegetales) y con ello aumentar el rendimiento del destilador por unidad de superficie expuesta al sol.

Los resultados de la literatura están asociados, casi en todos los casos, al antiguo planteamiento de Cooper (1973), que se puede combinar con las ecuaciones clásicas de transferencia de calor para elaborar un modelo matemático apropiado. En esta parte del trabajo, las ecuaciones apropiadas se toman de la referencia de Chargoy y Fernández<sup>2</sup>.

### 5.1. Resultados experimentales de referencia

El primer juego de datos experimentales empleado se incluye en los resultados de las mediciones en el campo reportadas para el 17 de mayo de 2017. Las mediciones experimentales se anotaron para cada media hora desde las 10:00 hasta las 17:00 h. Como se aprecia en la tabla respectiva, la variación de los tirantes de agua en las dos charolas evaporadoras se representa bien con una línea recta, por lo que se puede representar el fenómeno de variación de la

---

<sup>2</sup> Norberto Chargoy del Valle y José Luis Fernández Zayas, "Destilación solar de agua de mar en México, 1983 a 2003", SID/664, Serie Investigación y Desarrollo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, ISBN 978-607-02-1587-2, 105 pp, julio de 2010.

evaporación como lineal. Las principales variables del experimento se pueden representar como:

RadSolProm = 0.7228	Irradiancia en kW/m <sup>2</sup> , promedio durante la prueba
IntervaloExperimento = 25200	segundos durante las 7 horas del ensayo
HumRelInt = 18.3	Humedad relativa dentro de la caseta, en porcentaje
HumRelExt = 19.4	Idem, en el ambiente externo, también promedio
TempIntAmb = 55.0	Temperatura ambiente media en la caseta, °C
TempExtAmb = 37.7	Idem en el ambiente externo
DeltaTirInt = 0.003	Variación del tirante de agua en la charola interna, m
DeltaTirExt = 0.004	Idem, para la charola del exterior
EntalpiaAgua = 2253	Calor de vaporización del agua, kJ/kg

Con estos datos se pretende calcular la temperatura media del agua durante cada experimento, que por inspección de los experimentos, así como de la literatura, se espera que se ubique entre unos 3°C y 10°C sobre la temperatura media del ambiente. Este cálculo se aborda mediante la solución del balance térmico de la charola, que se ilustra en la figura de abajo y se configura de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, que afirma que la suma de los flujos de calor del agua determinan a lo largo del tiempo la variación de la temperatura. La ecuación se puede escribir como:

$$\sum_{i=0}^n q_i = M_{ag} C_{p_{ag}} \left( \frac{\Delta T_{ag}}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

En la ecuación anterior, los tres flujos principales de calor son: el flujo de calor que proviene del sol, que puede escribirse como

$$q_{sol} = RadSolProm * \alpha \quad (2)$$

En la cual la radiación solar promedio proviene del experimento y  $\alpha$  es la absorptancia de la superficie del agua de la charola, que se suele tomar en 0.95. Adicionalmente, el calor perdido por convección y radiación se suele escribir como



$$q_p = h (T_{agua} - T_{amb}) \quad (3)$$

Y, finalmente, el flujo de calor que acompaña la pérdida de agua por evaporación,  $Q_{evap}$ , que se puede calcular, a partir de los datos medidos, como el producto de la disminución del tirante (en todos los casos se considera que el área es unitaria) expresado en unidades de masa, multiplicado por el calor de evaporación o entalpía de vaporización.

Si se observan las ecuaciones anteriores, se advierte que la temperatura (desconocida) del agua,  $T_{agua}$ , obliga a acercarse a la solución del balance térmico por aproximaciones sucesivas. Si se supone que el valor del coeficiente en (3) es independiente de  $T_{agua}$ , se pueden obtener soluciones para diversos valores de  $h$  tales que resulten en una solución a  $T_{agua}$  congruente con otras experiencias empíricas. Tras varios intentos, se pueden adoptar valores de  $h = 0.002$  para las pérdidas térmicas dentro de la caseta, y de  $h = 0.04$  para el caso al aire libre. Ambos valores parecen razonables, y se adoptan para los fines meramente comparativos que siguen. Para esos casos, la temperatura del agua (en promedio durante la prueba) resulta de  $9.5^{\circ}\text{C}$  sobre la del aire, dentro de la caseta, y de  $4.5^{\circ}\text{C}$  sobre la del aire también, cuando se refiere a las pruebas al aire libre.

## 5.2. Comparación con las ecuaciones de Cooper

Con los datos previos de temperatura del agua y del aire, se pueden hacer comparaciones entre lo medido y lo que las ecuaciones de Cooper<sup>3</sup> estiman. Con las temperaturas establecidas anteriormente para el agua y el ambiente, tanto dentro como fuera de la caseta, se resuelven las ecuaciones citadas. Para ello se emplea un programa de cómputo en Basic que se incluye en el anexo 2, y que contiene comentarios que permiten seguir la secuencia de la obtención de resultados. De manera abreviada, la secuencia de cómputo se hace así:

- 1) Para cada par de valores de las temperaturas promedio del agua y del ambiente, se calculan las presiones parciales de vapor.

---

<sup>3</sup> Cooper, PI, "Digital simulation of transient solar still processes", Int J of Solar Energy **12**, pp 313-331, 1969.

- 2) Con las temperaturas y presiones parciales de vapor, se calcula el coeficiente convectivo mediante la ecuación de Cooper (ec. 37) de la referencia 1), y con éste, el coeficiente evaporativo (ec. 38).
- 3) Este coeficiente se emplea para calcular la cantidad de vapor que se produce durante el periodo analizado de 7 h, cuya masa se compara con la que se midió en los experimentos.
- 4) De la comparación entre los valores medidos de la masa de agua evaporada, y el cálculo mediante las ecuaciones de Cooper, se pueden desprender las conclusiones que se anotan enseguida.

### 5.3. Comparación

La tabla 5.1 muestra los resultados evaluados en campo contra lo calculado con las ecuaciones de Cooper:

Tabla 5.1: Resultados finales obtenidos (Elaboración propia, 2017).

<b>Producción de destilado, kg/7h</b>	<b>Interior</b>	<b>Exterior</b>
<b>Medido</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Calculado</b>	<b>(Para <math>\Delta T=9.5</math>) 8.4</b>	<b>(Para <math>\Delta T=4.5</math>) 3.3</b>

## 6. CONCLUSIONES

- Se llevaron a cabo otras corridas de cómputo con diversas combinaciones de coeficientes convectivos para estimar las temperaturas del agua, y en general las estimaciones coinciden en el orden de magnitud de los datos medidos y reportados en la literatura. En este sentido, el trabajo experimental valida la confiabilidad de las ecuaciones de Cooper.
- La estimación de que la temperatura del ambiente puede ser empleada como temperatura de condensación, para las ecuaciones de Cooper, queda validada. Adicionalmente, es aparente que la estimulación de la evaporación (por ejemplo, por la acción del viento) puede resultar en una evaporación mayor a la que las ecuaciones estiman. Así, queda validada la expectativa de los profesores Vega-Silva de que un incremento importante en el área de evaporación, con el área de condensación constante, puede resultar en una productividad mayor a la de los destiladores directos convencionales.
- Los resultados calculados, avalados por experimentos propios aquí reportados, revela la necesidad de incrementar la investigación básica en la aportación de calor suplementario para el destilador, lo que aumentaría la tasa de evaporación, y desde luego de efectuar investigación empírica metódica para entender el mecanismo de desacoplamiento de la destilación solar, y eventualmente formular modelos matemáticos más apropiados que los de Cooper.

## 7. RECOMENDACIONES

- Se sugiere que la fuente de abastecimiento de agua salina se encuentre cercana al destilador solar para que facilite el traslado del agua al sistema.
- La limpieza diaria de la cubierta de la caseta, así como del colector solar, influye de manera positiva en la eficiencia del equipo.
- Se deberá limpiar diariamente las bandejas de agua ya que se evitará que queden residuos de sal en ellas.
- Las telas pañalina se deberán enjuagar diariamente para evitar que queden residuos de sal en ellas y sigan teniendo un rendimiento efectivo.
- Se realizará una purga semanal para el colector solar para evitar que queden residuos de sal en la tubería.
- Se recomienda conectar a la celda solar una batería externa la cual almacenara energía solar para que cuando no haya radiación solar siga funcionando el extractor.
- Evaluación de los precios unitarios con el fin de estimar la inversión inicial del sistema, así como los costos de operación y mantenimiento.
- Sensibilizar y capacitar a las personas involucradas con el proyecto con el fin de que conozcan los beneficios y funcionamiento de cada uno de las partes del equipo.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al Hamadani Ali, Shukla S.K. (2013). Performance of single slope solar still with solar protected condenser. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*.Pg. 6-28.

Badran Omar, Al Tahaineh (2005). The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity. *Desalination* Num 183. Pg. 137-142.

Chaichan Miqdam, Kazem Hussein. (2015). Water Solar Distiller productivity enhancement using concentrating solar water heater and phase change material (PCM). *ELSEVIER* Pg. 151-159.

Chargoy del Valle Norberto y José Luis Fernández Zayas (2010) "Destilación solar de agua de mar en México, 1983 a 2003", SID/664, Serie Investigación y Desarrollo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, ISBN 978-607-02-1587-2, 105 pp, julio de 2010.

Chinappi Ciccolella Italia, Jerrez Carrizo Alonso, Rosales Chirinos John. (2007) Destilador de Agua Solar para potabilizar agua en zonas rurales. Determinación de costos. *Academia* Vol. VI. Pg. 70-76. Venezuela.

CONAGUA (2014). Estadísticas del Agua en México. México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Capítulo 2 Pg. 25-35. Capítulo 3 Pg.73-75

Cooper P (1973). Heat and mass transfer within a solar still envelope, ISES Congress: The sun in the service of mankind, II. E49 Paris, Francia.

Covantes Hugo (1989). Energía solar. La energía solar Pg.89. México: Fondo de Cultura Económica.

Duffie John, Beckman William. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Capítulo 1 Pg. 3-20 New Jersey: Wiley.

Escoda, Salvador (2011). Manual Práctico de Ventilación. Capítulo 1 Pg. 54 – 89 y 129- 132. Barcelona España, Soler and Palau.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006). Water Desalination for Agricultural Applications. Capítulo 1 Pg. 7-10 FAO, Rome.

Fernández José Luis (1994). Destiladores Solares de grandes dimensiones para agua de mar. *Academia Mexicana de Ingeniería*

Gudiño Ayala Raúl. (1995). Energía Solar. Capítulo 11 Pg. 100-105  
Encontrado el día 19-diciembre-2015, de ITESO Sitio web:  
[http://www.catalogosolar.mx/download/curso\\_iteso.pdf](http://www.catalogosolar.mx/download/curso_iteso.pdf)

Kalogirou Soteris (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press. Chapter 3 Pg. 150- 181.

Morad M.M. El-Maghawry Hend AM, Wasfy Kamal I. (2015). Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover. ELSEVIER Pg. 1-9.

Mott Robert (1996). Mecánica de fluidos. México Pearson Education. Capítulo 8 y Capítulo 9. Pg. 191 – 250.

Naciones Unidas (1972). La destilación solar como medio de satisfacer necesidades de agua de poca magnitud. ONU. Capítulo 1. Pg. 17-21.

Popular Mechanics Magazine (1952). Sea Water still, pg. 113.

Porta Miguel Ángel, Fernández José Luis, Chargoy N. (1998). “La experiencia mexicana en el diseño y operación de destiladores solares”. *Información Tecnológica*. No. 9, Pg. 261 - 266.

Rubio Cerda Eduardo, Fernández Zayas José Luis, Porta-Gándara Miguel (2003). Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills. ELSEVIER. Pg. 895-906.

Sampathkumar K, Arjunan T.V. Pitchandi P., Senthilkumar P. (2010). “Active solar distillation – A detailed review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol.14, Pg. 1506-1509.

Shukla, S.K. (2014). “Application of Solar Distillation Systems with Phase Change Material Storage”. *Modern Mechanical Engineering*.India, Springer Berlin Heidelberg. Pg 18-20.

Silva Martinez Ana Elisa (2012) . “Mejoramiento de la calidad de aguas Salinas y salobres mediante un sistema de evapotranspiración y destilación solar”. Tesis de doctorado. UNAM México DF. Capítulo 2 Pg. 10-16, Capítulo 3 Pg. 1-14; Capítulo 4 Pg. 1-11.

Velmurugan V, Gopalakrishnan M, Raghu R, Srithar K. (2008).Single basin solar still with fin for enhancing productivity. *Energy convers.*

Yabroudi Carolina, Cárdenas Carmen, Aldana Leonardo, Núñez José, Herrera Lenin (2011). *Interciencia*. Vol. 36 No. 10 Pg. 732

World Water Assessment Programme (2003). *Water for People, Water for life*. Barcelona: UNESCO and Berghahn Books.

## 9. Anexos

### 9.1. Anexo 1. Comparación entre los diferentes tipos de destiladores

La tabla A1 “Comparación entre los diferentes tipos de destiladores solares” muestra las principales características de distintos prototipos de destiladores solares activos (Yabroudi, et. al. 2011).

Algunos de los experimentos que se han llevado a cabo para mejorar el rendimiento de los destiladores solares activos son importantes ya que en algunos casos han logrado una mayor cantidad de agua destilada, por ejemplo, el destilador solar multi-efecto propuesto por (Abdel, 2006) es el que ofrece una mayor cantidad de destilado reportando 24L al día lo cual lo hace muy atractivo en rendimiento comparado con el destilador solar con colector de placa y circulación forzada (Raí, et. al 1990) el cual apenas logra destilar 6.75L al día.

Por otro lado, para la aplicación de estos nuevos procesos se requiere de conocimientos más técnicos para hacerlos funcionar, en algunos casos se requiere de personal capacitado y en otros el uso de bombas mecánicas para llevar a cabo la operación, como el Destilador Solar de regeneración activa (Tiwari, 2008) o el Destilador Solar vertical acoplado a colector de placa (Kiatsiroat, 1987).

Existe otro tipo de destiladores solares activos que para su funcionamiento requieren el uso de energía eléctrica descartando su aplicación en comunidades sin suministro de electricidad, tal es el caso del destilador solar de regeneración acoplado a concentrador parabólico (Kumar y Sinha, 1996).

También hay que tomar en cuenta los costos de instalación y de mantenimiento por ejemplo hay destiladores solares en los que los costos son bajos por ejemplo el destilador solar con precalentamiento de agua (Tiwari y Maduri, 1985), el



destilador solar tipo invernadero (Voropoulos, 2004) ya que estos sistemas son fáciles de operar y de mantener. En cambio el destilador solar vertical acoplado a colector de placa (Kiatsiroroat, 1987) presenta altos costos de operación y aún no hay muchas investigaciones acerca de su funcionamiento.

Es importante conocer los pros y contras de los diferentes tipos de destiladores solares activos ya que con esto se puede elegir el mejor.

Las últimas investigaciones sobre destiladores solares realizadas tratan sobre el mejoramiento en el rendimiento de estos utilizando materiales de cambio de fase (PCM) para retener el calor por más tiempo. Por ejemplo, (Chaichan y Kazem, 2015) desarrollaron un destilador solar el cual utiliza cera de parafina que se coloca debajo del colector solar para preservar la temperatura del agua por más tiempo durante la noche. Otra mejora que realizaron fue integrar a su colector solar activo parabólico un intercambiador de calor en forma de tanque, el cual está forrado de fibra de vidrio y también tiene un recubrimiento de cera de parafina para mantener a una determinada temperatura el agua que finalmente alimentará al colector solar cilíndrico al cual está conectado.

Otra investigación utilizando (PCM) es la que se lleva a cabo en la Universidad Banaras en la India. En este caso (Al Hamadani y Shukla, 2013) han desarrollado un colector solar de una vertiente, al cual se le agregó una segunda cámara de condensación forrada con aluminio con la finalidad que funcionen como reflectores dentro de la cámara. Esta cámara se encuentra cubierta con una tapa con la finalidad de conservar la cámara lo más fresca posible y así aumentar la condensación en el sistema. Este sistema cuenta con tres charolas, de las cuales solo la primera está pintada de negro, esta charola se encuentra dentro del destilador, mientras que las otras dos se encuentran en la cámara de condensación. A la bandeja uno se le agregó unas aletas y debajo de las aletas se

utilizó el (ácido láurico<sup>4</sup>). Después de experimentar el modelo se vio que mejoró la productividad, sobre todo en la noche.

Por otra parte, en la Universidad Zagazig de Egipto (Morad, 2015) ha encontrado mejoras en el rendimiento para los destiladores solares de doble pendiente colocando sistemas de enfriamiento sobre la cubierta, ayudando a que el proceso de condensación sea más rápido. Miden también la profundidad del tirante y el espesor de la cubierta del vidrio, ya que combinado con el sistema de enfriamiento sobre la cubierta resultó muy funcional manejar un tirante de 1 cm combinado con un espesor de 3 mm para la cubierta y el sistema de aspersion, activándolo cada 5 minutos.

La Tabla A1 muestra de forma más completa el análisis de los destiladores solares antes mencionados.

---

<sup>4</sup> Ácido graso de buena estabilidad química no tóxico, con alta resistencia térmica.

**Tabla A1 Comparación entre diferentes tipos de destiladores (Yabroudi, et. al. 2011).**

Comparación entre diferentes tipos de destiladores solares					
No.	Tipo	Autores	Especificaciones	Resultados experimentados	Comentarios
1	Destilador solar con colector de placa (circulación forzada)	Rai et al., 1990 (Nueva Delhi, India)	Ángulo de inclinación: 45° Área: 1x1 m	Máxima producción de destilado: 6.75 kg/m <sup>2</sup>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Requiere bombas para suministro de agua.</li> <li>2. Debe de considerarse el consumo de electricidad para el funcionamiento de la bomba.</li> <li>3. Problemas operacionales pueden ocurrir durante el proceso.</li> </ol>
2	Destilador solar con colector de placa (circulación natural)	Badran y Al Tahaine, 2005 (Omán Jordania)	Área: 1x1 m Ángulo de inclinación: 35°	Máxima producción de destilado 3.50kg/m <sup>2</sup>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Menor productividad en comparación con el de circulación forzada.</li> <li>2. Fácil de operar.</li> </ol>
3	Destilador solar de doble efecto	Kamar y Tiwari 1996 (Nueva Delhi, India)	Área: 1x1 m. Ángulo de inclinación: 15°. Flujo: 40 ml·min <sup>-1</sup> . Espacio entre las 2 cubiertas de vidrio: 20 cm. Bomba: 0.2 HP	Alternando la operación con modo pasivo y activo, la producción de destilado fue de 2.2 - 3.9 L/día.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fácil operación y mantenimiento.</li> <li>2. La operación bajo el modo "doble efecto" no mejora la producción diaria de destilado por la dificultad para mantener caudales bajos y uniformes sobre las cubiertas de vidrio.</li> </ol>
4	Destilador solar de regeneración activa	Tiwari y Sinha, 1993 (Nueva Delhi, India)	Área 1m <sup>2</sup> . Flujo: 0.20 kg·seg <sup>2</sup> . Emplea intercambiador de calor	Rendimiento máximo 1; 0.7; 0.3 y 0.02 kgm <sup>2</sup> para 13 hrs de operación bajo modos de regeneración activa, no activa, pasiva, y no pasiva, respectivamente.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alto costo inicial.</li> <li>2. Diseño y operación compleja.</li> <li>3. Requiere personal especializado.</li> <li>4. Posibles pérdidas en el intercambiador.</li> </ol>
5	Destilador solar con colector de placa paralelo	Yadav y Prasad, 1995 (Nueva Delhi, India)	Área: 1x1 m. Longitud del colector de placa paralelo: 1 m	Producción máxima: 0.250 kg·m <sup>2</sup> . Se registró temperatura máxima del agua de 69°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diseño simple comparado con destilador acoplado a colector de placa, sin embargo su productividad es menor.</li> </ol>
6	Destilador solar vertical acoplado a colector de placa	Kiatsiriroat et al, 1987 (Bangkok, Tailandia)	Área de colección: 1.4 m <sup>2</sup> Ángulo de inclinación: 15°	Optimización del proceso con 5 placas de evaporación para una producción de destilado de 50 kg·h.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Requiere de bombas.</li> <li>2. Alto costo de operación comparado con otros que emplean colectores de placa.</li> <li>3. Pocas investigaciones reportadas.</li> </ol>
7	Destilador solar acoplado a concentrador parabólico	Zeinab et al, 2007 (Giza, Egipto)	Diámetro tubo de cobre: 0.0095 mm. Longitud tubo de cobre: 14.4 m. Área de colección: 80 cm de largo y 0.04 cm de espesor	Producción: 2.75 L/día	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Más económico que destilador tipo convencional.</li> <li>2. Posee un mayor número de partes en comparación con otros sistemas.</li> </ol>

**Continuación Tabla A1 Comparación entre diferentes tipos de destiladores.**

Comparación entre diferentes tipos de destiladores solares (continuación)					
No.	Tipo	Autores	Especificaciones	Resultados experimentados	Comentarios
8	Destilador solar de regeneración acoplado a concentrador parabólico	Kumar y Sinha, 1996 (Nueva Delhi, India)	Área: 1 m <sup>2</sup> . Espesor aislamiento 0.004 m. Área concentrador parabólico: 0.086 m <sup>2</sup> . Flujo: 0.05 kg·s <sup>-1</sup> . Velocidad del viento: 5 m·s <sup>-1</sup>	Producción: 8.2 L/día. La eficiencia térmica del destilador con concentrador parabólico acoplado es mayor que el colector de placa plana	1. Proceso más complejo trabajando con flujo constante de agua 2. Requiere de bomba para recirculación de agua. 3. No es adecuado para ser aplicado en comunidades rurales. 4. Alto costo de capital en comparación con otros destiladores solares.
9	Destilador solar acoplado a tubos colectores	Tiwari et al., 2007 (Nueva Delhi, India)	Área: 1m <sup>2</sup> . Masa de agua: 50 kg. Área del tubo colector: 2 m <sup>2</sup> . Flujo: 0.035 kg·s <sup>-1</sup>	Producción: 4 kgm <sup>-1</sup> /día. Eficiencia térmica: 17%	1. Opción más viable para calentamiento y destilación simultánea de agua.
10	Destilador solar multi-etapa	Ahmed et al., 2009 (Kualalumpur, Malasia)	Número de etapas: 3. Recirculación de agua salobre a través de una bomba.	Producción máxima: 14.2 kgm <sup>-2</sup> /día	1. Mayor productividad comparando con otros sistemas. 2. El diseño cilíndrico en términos de seguridad y flexibilidad es más ventajoso comparado con el diseño rectangular. 3. Costo del galón de agua destilada de \$0.026 dólares
11	Destilador solar tipo burbuja de aire	Pandey, 1984 (Nueva Delhi, India)	Área: 0.67 m <sup>2</sup> . Ángulo de inclinación: 10°	Incremento de producción de destilado: 7.1% empleando burbujas de aire: 34%, 34% con burbujas de aire seco; 48% con burbujas de aire seco más enfriamiento con cubierta de vidrio, y 31% empleando solo enfriamiento con cubierta de vidrio.	1. Diseño y construcción simple. 2. Requerimientos de energía para el funcionamiento del motor.
12	Destilador solar híbrido o de tipo invernadero	Varapoulos et al., 2004 (Grecia)	Área de colección: 5 x 2.5 m. Tanque con capacidad de almacenamiento de 37.50 L. Profundidad del agua: 5 cm. Área: 1x1 m	Producción de 36, 57 y 75% de agua destilada para tanque de almacenamiento de 0.5, 0.25, y 1L, respectivamente, con suministro de energía de 1,990, 3,300 y 5,200 MJ.	1. Producción simultánea de agua caliente y destilado. 2. Diseño y operación simple
13	Destilador con precalentamiento de agua	Tiwari y Madhuri, 1985 (Nueva Delhi, India)	Área 1x1 m	Producción de destilado de 0.5 kg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> con flujo de: 0.006 kg·s <sup>-1</sup> . Aumento en la eficiencia de producción de destilado al incrementar la temperatura del flujo de agua	1. Fácil de operar y mantener. 2. Mayor tasa de producción en comparación con los destiladores simples.

## 9.2. Anexo 2. Programación en Just Basic

- ' Evaporación del agua desde dos charolas - Tesis Fabricio Izcaret Valle
- '
- ' 7 de junio de 2017
- ' Se simula la pérdida de agua por evaporación (difusión) al aire ambiente.
- ' Se simulan dos casos: la charola, o bandeja, con un tirante inicial Tirante Agua Inicial
- ' de agua a una temperatura conocida, a un medio ambiente de temperatura y humedad
- ' conocidas, con una de ellas en el ambiente exterior a la caseta de destilación de
- ' la azotea de la DEPMI, y la otra idéntica pero dentro de la caseta. Así se modifican las condiciones
- ' ambientales de ambas charolas, para evaluar el modelo matemático de Dunkle.
- '

---

- ' Evaporación de agua de una charola en la UNAM
- ' La fecha del experimento que se reproduce aparece al inicio de este listado.
  
- LET RadSolProm = 0.7228 ' en kW por metro cuadrado
- LET IntervaloExperimento = 25200 ' Son 7 h a 3600 s cada hora
- LET HumRelInt = 18.3 ' Humedad relativa dentro de la caseta, en porcentaje
- LET HumRelExt = 19.4 ' Idem, en el ambiente externo, también promedio
- LET TempIntAmb = 55.0 ' Temperatura ambiente media en la caseta
- LET TempExtAmb = 37.7 ' Idem en el ambiente externo
- LET DeltaTirInt = 0.003 ' Variación del tirante de agua en la charola interna, m
- LET DeltaTirExt = 0.004 ' Idem, para la charola del exterior
- LET EntalpiaAgua = 2253 ' Entalpía de cambio de fase o calor de vaporización
  
- ' Calculo los flujos de calor para determinar la temperatura del agua promedio en el experimento:
- '  $q_{sol} - q_p - q_{evap} = Mag C_{pag} (D \Delta T_{ag} / \Delta t)$  donde D es delta,
- '  $q_{sol}$  proviene del experimento como  $q_{sol} = 0.723$  kW (todo es para un área unitaria  $A = 1$  metro cuadrado)
- '  $q_{evap}$  se obtiene de la variación en el tirante  $\Delta T_{tirInt}$  o  $\Delta T_{tirExt}$
- '  $q_{evap} = (\Delta T_{tirInt} * 1 * 1000 * 2253) / IntervaloExperimento$ , donde 2253 es entalpía de cambio de fase
- ' y 1000 es la densidad del agua, así que se tiene

```
' qevap = 0.268 kW
' Para calcular la diferencia de temperaturas del agua al ambiente, en
promedio, es necesario
' hacer una serie de suposiciones. De la literatura, se tiene que el agua puede
estar hasta 10°C más caliente
' que el aire ambiente. Esta suposición requiere que el flujo de calor que pierde
el agua de la charola
' al ambiente sea del orden de 0.414 kw en promedio, que se puede obtener
con un coeficiente global de
' pérdidas térmicas hp del orden de 0.04 kW/m² K, que corresponde a una
ventilación muy efectiva.
' Al sustituir en la ecuación del balance de energía, para una evaporación de 3
kg, un Cp = 4.18 y un
' intervalo de operación de 25,200 s, si uso una absorptancia del agua de 0.95,
resulta:
' D Tag = ((qsol x alfa) - qp - qevap)* IntervaloExperimento) / (MasaEvap * Cp),
y en números,
' D Tag = ((0.723 * 0.95) - 0.414 - 0.268) * 25200) / (3 * 4.18) = 9.75°C
'
' Similarmente, para la charola en el exterior, los resultados serían:
' qp = 0.357 kW, para hp = 0.073 y D Tag = 4.5°C
LET Tamb = TempExtAmb
LET T=Tamb
LET TempCub = T
```

```
GOSUB [PresionParcialVapor] ' Calcula presión parcial del vapor a T
ambiental
```

```
LET Pamb=P ' Esta es la presión parcial del vapor de agua a
la temperatura del ambiente
' Pcubier=P
```

```
LET T=Tamb + 9.5 'La temperatura del agua es 9.5°C más alta
que la del ambiente interior
LET TempAgua = T
```

```
GOSUB [PresionParcialVapor] 'Calcula presión parcial del vapor a T agua
```

```
LET Pagua=P
```

```
GOSUB [CoefConvectAguaCubierta] ' Retengo la nomenclatura, pero se
refiere a evaporación al ambiente a Tamb
```

```
GOSUB [CoefEvaporAguaCubierta] ' donde "cubierta" se refiere a las
condiciones del ambiente
```

```
GOSUB [FlujoMasaEvap]
GOTO [Impresiones]

[PresionParcialVapor]
'
' Se calcula la presión parcial P en kPascales en función de la temperatura T
en °C.
'
LET P=0.61121 * exp((18.678-T/234.5)*(T/(257.14+T)))

RETURN

[CoefConvectAguaCubierta]

'Probemos en ambas direcciones del flujo convectivo:

IF TempAgua > TempCub THEN CoefConv=0.884*(((TempAgua+273)-
(TempCub+273)+(((Pagua-Pcubier)*1000)/((268.9-
Pagua)*1000))*(TempAgua+273)))^(1/3)

IF TempAgua < TempCub THEN CoefConv=0.884*((( (-1)*TempAgua+273)-((-
1)*TempCub+273)+(((Pagua-Pcubier)*1000)/((268.9-
Pagua)*1000))*(TempAgua+273)))^(1/3)
IF TempAgua < TempCub THEN CoefConv= (-1)*CoefConv

LET CoeficienteInternoConveccion = CoefConv
RETURN

[CoefEvaporAguaCubierta]

IF TempAgua < TempCub THEN CoefEvap = 0

IF TempAgua > TempCub THEN CoefEvap= 16.276*CoefConv*((Pagua-
Pcubier))/((TempAgua+273)-(TempCub+273)) '

'PRINT "CoefEvap = "; CoefEvap

RETURN

[FlujoMasaEvap]

' Se calcula el flujo de calor evaporativo como  $q_e = h_e * A_c * (T_{agua} - T_{cubierta})$ 
' De ahí, el flujo másico de vapor a la cubierta, en kg/s
```



---

LET CalorEvap = CoefEvap \* 1 \* (TempAgua - TempCub)

LET FlujoMasaEvap = CalorEvap/EntalpiaAgua

LET MasaEvap = FlujoMasaEvap \* IntervaloExperimento/1000

RETURN

---

[Impresiones]

```
PRINT "Temperatura ambiental = ";
PRINT USING ("###.#", Tamb);
PRINT "°C"
PRINT "Temperatura del agua = ";
PRINT USING ("###.#", TempAgua);
PRINT "°C"
PRINT
PRINT
PRINT "Coeficiente convectivo= ";
PRINT USING ("##.#", CoefConv);
PRINT " W/m2 K"
PRINT "Masa de agua evaporada= ";
PRINT USING ("##.#", MasaEvap);
PRINT " kg"
```

END



### 9.3. Anexo 3. Análisis de costos

A continuación se muestra el análisis de precios unitario para el sistema antes descrito.

**Tabla A3.1 Colector Solar Plano (Elaboración propia, 2017).**

<b>Pieza</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo unitario (M.N.)</b>
1	Lámina galvanizada calibre 26	\$700
5	Tubos de cobre 13mm*	\$328
5	Cobre rollo calibre 28*	\$747
5	Cortes lámina de cobre	\$75
1	Lámina de policarbonato transparente	\$900
1	Rollo polyfoam	\$18
2	Fibra de vidrio	\$85
2	Sellador silicón	\$76
5	Soldadura omega 50 x 50 (3mts)	\$75.6
1	Pasta para soldar	\$65
10	Abrazadera sin fin	\$13
1	Lima	\$20
8	Tornillos 1/4	\$0.65
8	Tuercas 1/4	\$0.5
8	Rondanas presión 1/4	\$0.23
1	Pintura negra spray mate (alta temperatura)	\$95
1	Soldadura (mano de obra)	\$500
1	Cinta plateada	\$42
	<b>TOTAL</b>	<b>\$4,632</b>

\* Precio por metro.

**Tabla A3.2 Tubería Colector Solar Plano (Elaboración propia, 2017).**

<b>Pieza</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo unitario (M.N.)</b>
1	Tubo PVC hidráulico 13mm	\$75.48
10	Tee PVC 13 mm	\$5
10	Reducción bushing 13x10mm	\$9
2	Adaptador hembra 13mm	\$5
2	Tapón rosca 13mm	\$11
1	Pegamento PVC	\$94.83
1	Cinta teflón	\$5
1	Soldadura tubería cobre (mano de obra)	\$350
10	Conectores 13mm cobre	\$56.63
	<b>TOTAL</b>	<b>\$1,264</b>

**Tabla A3.3 Sistema de extracción de vapor (Elaboración propia, 2017).**

<b>Pieza</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo unitario (M.N.)</b>
1	Ventilador	\$150
1	Celda solar	\$1,000
1	Campana extractora	\$14.5
1	Codo	\$5
1	Tubo PVC sanitario (5cm)	\$5
1	Reducción PVC	\$4
1	Tubo PVC sanitario (45cm)	\$45
	<b>TOTAL</b>	<b>\$1,224</b>

**Tabla A3.4 Serpentín (Elaboración propia, 2017).**

<b>Pieza</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo unitario (M.N.)</b>
1	Hielera	\$0
1	Manguera 1"	\$30
1	Brida PVC 1"	\$128
1	Recipiente destilando	\$10
1	Espiga	\$116
15	Bolsas gel refrigerante	\$13
	<b>TOTAL</b>	<b>\$479</b>

**Tabla A3.5 Líneas de conducción y conexiones (Elaboración propia, 2017).**

<b>Pieza</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo unitario (M.N.)</b>
1	Válvula 1/2"	\$290
1	Válvula 1/4"	\$202
1	Espiga 3/16" x 1/4"	\$34
1	Espiga 1/4" x 1/4"	\$58
1.5	Manguera 1/2"	\$25
12	Manguera 1/4"	\$6
5	Codos 1/4"	\$60
3	Tee 1/4"	\$70
1	Bolsa 20 cinchos	\$20
1	Tanque 120 Litros	\$0
	Tela Pañalina	\$243
	<b>TOTAL</b>	<b>\$1,467</b>

**Tabla A3.6 Banco contenedor de agua salada (Elaboración propia, 2017).**

<b>Pieza</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo unitario (M.N.)</b>
2	Varillas 1/4"	\$112
4	Solera 1/8" x 1"	\$60
2	Frascos pintura negra mate	\$50
1	Thinner	\$17.5
	Mano de obra	\$250
	<b>TOTAL</b>	<b>\$720</b>

**Tabla A3.7 Banco colector solar plano (Elaboración propia, 2017).**

<b>Pieza</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo unitario (M.N.)</b>
6	Postes 2.44m	\$110
12	Tornillo gota 1/4"	\$8.14
12	Tuercas 1/4"	\$0.5
12	Rondana plana 1/4"	\$0.6
1	Limaton con mango	\$101
	<b>TOTAL</b>	<b>\$872</b>

### 9.4. Anexo 4. Experimentación

Los datos presentados en las tablas A4.1, A4.2 y A4.3 corresponden a la experimentación realizada el día 3 de mayo de 2017.

Tabla A4.1 Diferencia de tirante (3 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	2.9
12:30	3	2.9
13:00	3	2.8
13:30	3	2.8
14:00	2.9	2.7
14:30	2.9	2.7
15:00	2.9	2.6
15:30	2.9	2.6
16:00	2.9	2.6
16:30	2.8	2.5
17:00	2.8	2.5

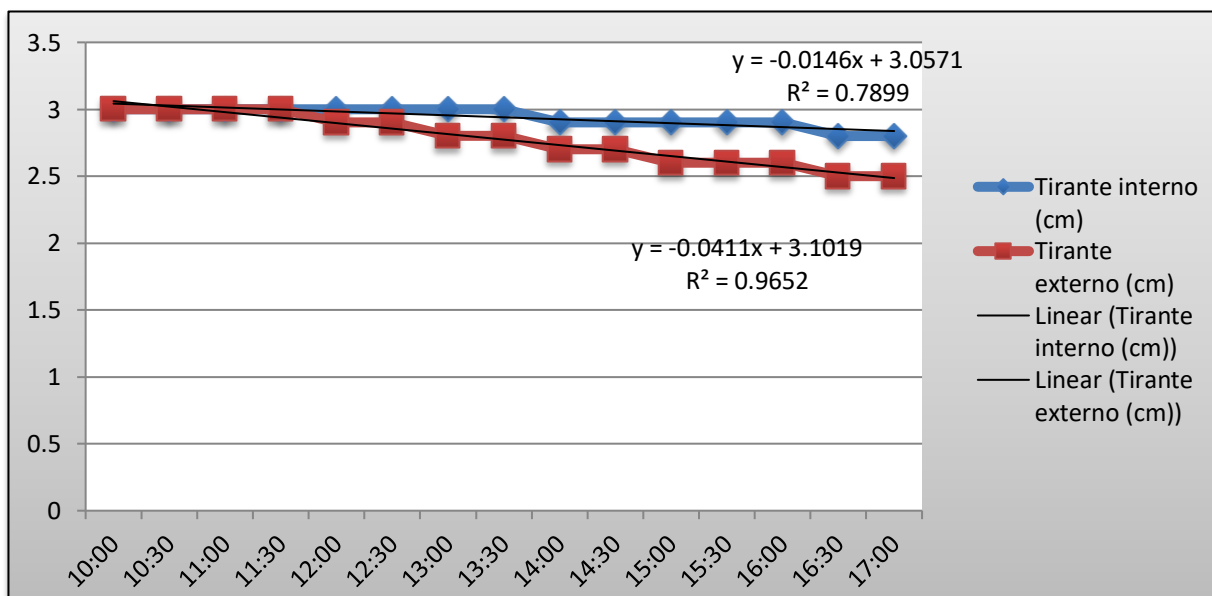


Figura A4.1 Diferencia de tirante (3 Mayo 2017)

Tabla A4.2 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (3 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	24.779	34.381	24.605	33.925
10:30	39.555	15	27.899	27.399
11:00	48.086	19.971	31.816	21.346
11:30	53.273	18.018	34.15	19.503
12:00	52.797	21.374	36.525	17.775
12:30	54.504	21.07	34.545	18.457
13:00	48.818	29.302	32.613	18.067
13:30	45.732	33.351	31.816	35.307
14:00	51.86	27.682	35.77	22.703
14:30	55.693	24.029	36.796	20.265
15:00	43.507	41.375	29.89	19.04
15:30	43.416	38.301	29.665	15.704
16:00	53.94	15	32.278	17.047
16:30	41.338	27.251	27.136	27.341
17:00	41.777	23.652	24.267	31.685

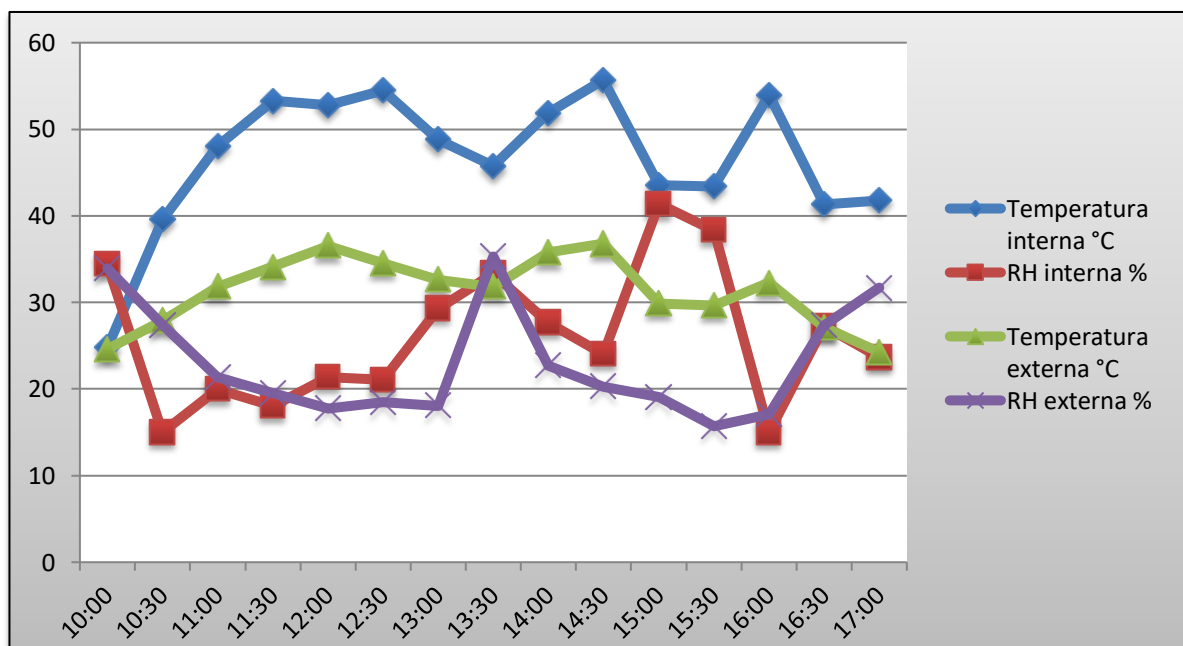


Figura A4.2 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (3 Mayo 2017)

Tabla A4.3 Radiación Solar (3 Mayo 2017)

Hora	Radiación W/m <sup>2</sup>
10:00	811
10:30	830
11:00	989
11:30	995
12:00	1059
12:30	1040
13:00	1000
13:30	995
14:00	410
14:30	389
15:00	400
15:30	435
16:00	600
16:30	420
17:00	389

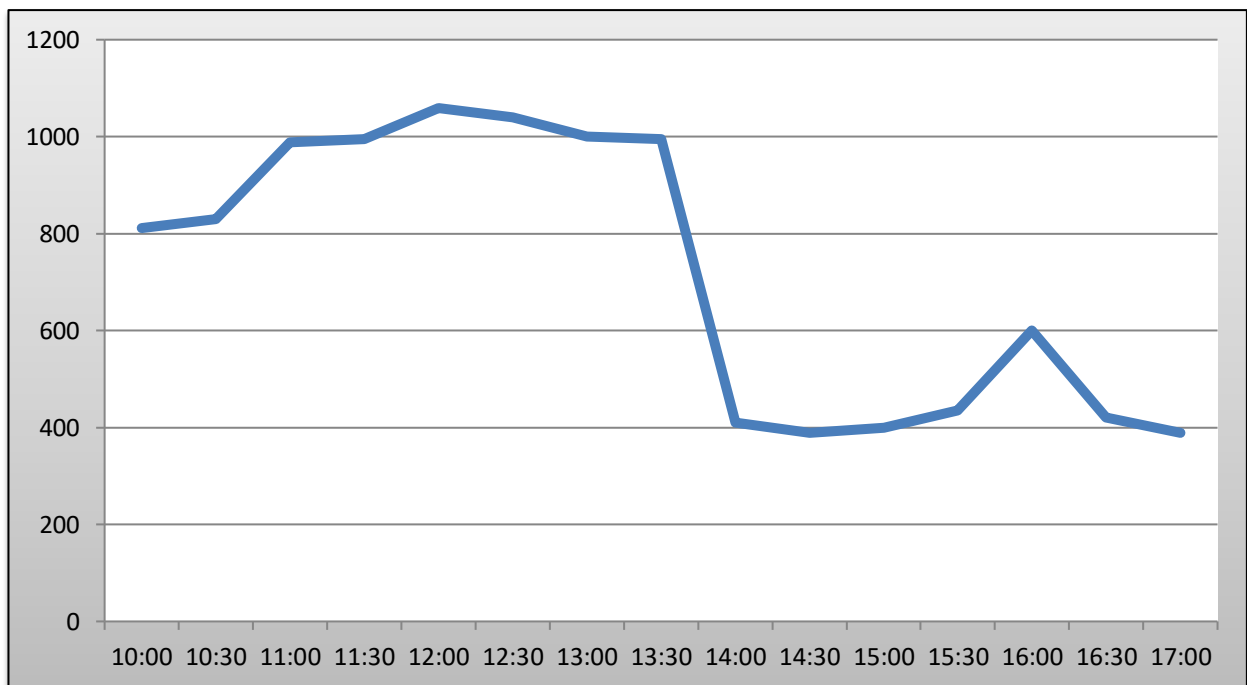


Figura A4.3 Radiación Solar (3 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.4, A4.5 y A4.6 corresponden a la experimentación realizada el día 4 de mayo de 2017.

**Tabla A4.4 Diferencia de tirante (4 Mayo 2017)**

<b>Hora</b>	<b>Tirante interno caseta (cm)</b>	<b>Tirante externo (cm)</b>
<b>10:00</b>	3	3
<b>10:30</b>	3	3
<b>11:00</b>	3	3
<b>11:30</b>	3	2.9
<b>12:00</b>	2.9	2.9
<b>12:30</b>	2.9	2.8
<b>13:00</b>	2.9	2.8
<b>13:30</b>	2.9	2.7
<b>14:00</b>	2.8	2.7
<b>14:30</b>	2.8	2.7
<b>15:00</b>	2.8	2.6
<b>15:30</b>	2.8	2.6
<b>16:00</b>	2.8	2.6
<b>16:30</b>	2.8	2.6
<b>17:00</b>	2.8	2.6



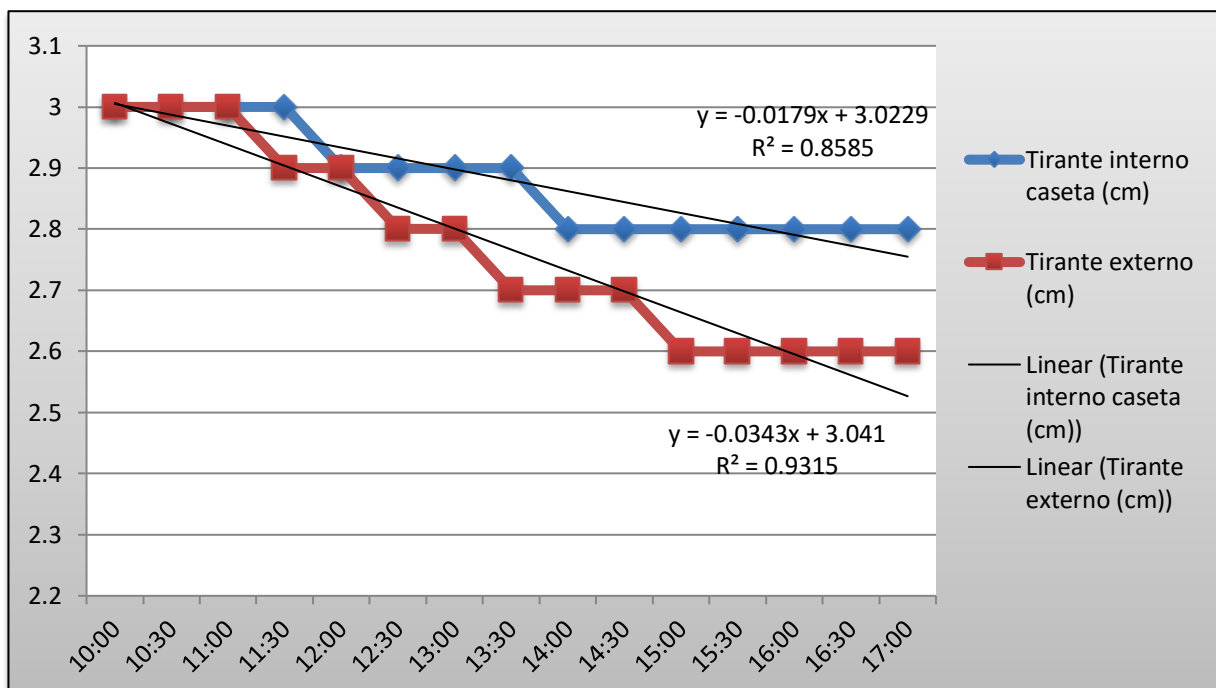


Figura A4.4 Diferencia de tirante (4 Mayo 2017)

Tabla A4.5 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (4 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna (°C)	RH interna (%)	Temperatura externa (°C)	RH externa (%)
10:00	23.016	37.056	23.165	36.307
10:30	33.053	31.006	36.561	23.606
11:00	43.616	25.991	49.087	15
11:30	46.099	25.589	52.434	15
12:00	48.504	24.957	51.575	16.26
12:30	50.197	24.524	53.053	15.199
13:00	40.833	33.438	42.368	30.513
13:30	36.905	41.498	39.498	36.46
14:00	41.913	37.22	45.011	30.54
14:30	45.279	32.274	46.622	28.082
15:00	43.043	36.947	47.106	29.287
15:30	38.449	35.787	39.131	33.078
16:00	31.128	38.941	31.952	36.79
16:30	28.048	48.392	28.723	49.959
17:00	22.944	54.185	27.536	31.793

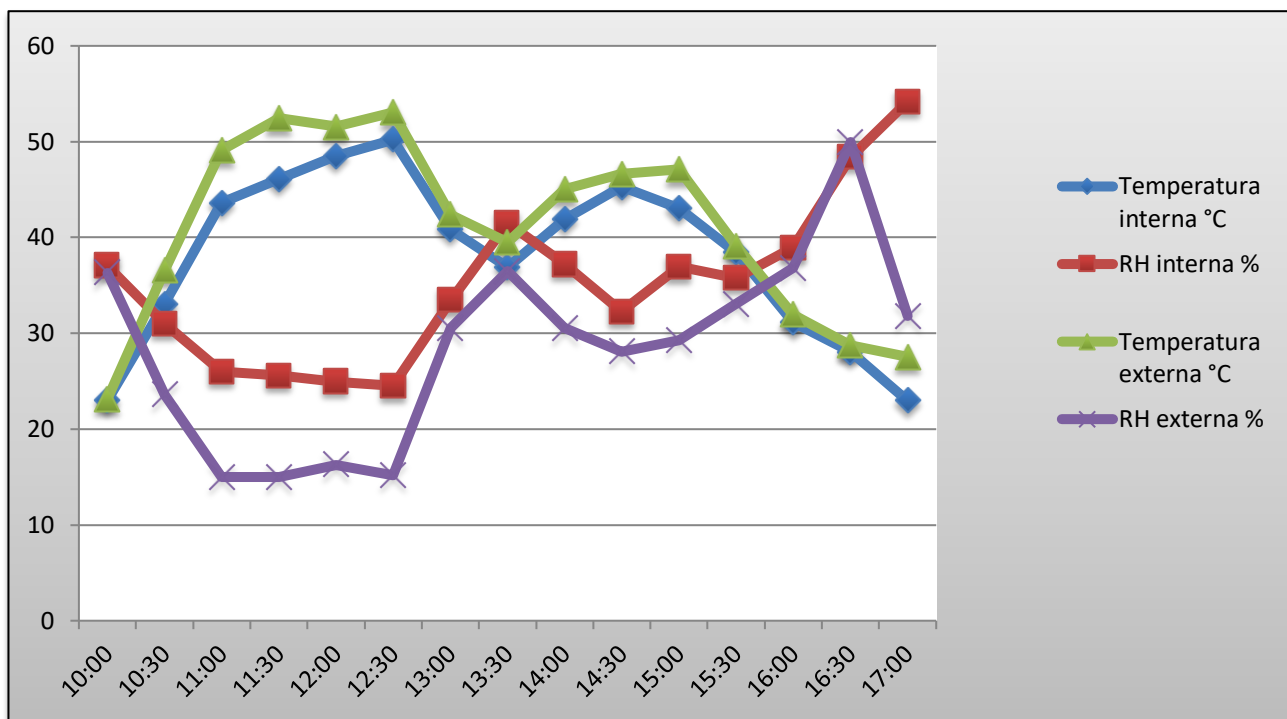


Figura A4.5 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (4 Mayo 2017)

Tabla A4.6 Radiación Solar (4 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	820
10:30	835
11:00	856
11:30	906
12:00	1000
12:30	1063
13:00	906
13:30	900
14:00	815
14:30	589
15:00	635
15:30	380
16:00	395
16:30	425
17:00	383

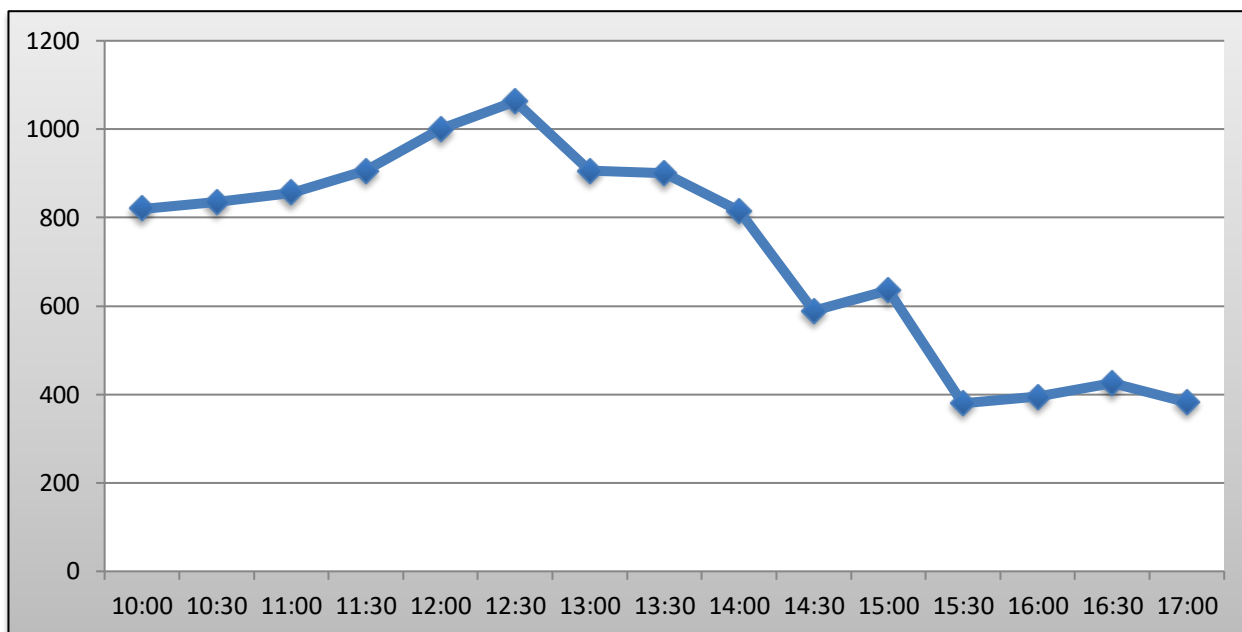


Figura A4.6 Radiación Solar (4 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.7, A4.8 y A4.9 corresponden a la experimentación realizada el día 5 de mayo de 2017.

Tabla A4.7 Diferencia de tirante (5 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno caseta (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	2.9
12:00	3	2.9
12:30	2.9	2.8
13:00	2.9	2.8
13:30	2.9	2.7
14:00	2.9	2.7
14:30	2.8	2.6
15:00	2.8	2.6
15:30	2.8	2.5
16:00	2.8	2.5
16:30	2.8	2.5
17:00	2.8	2.4

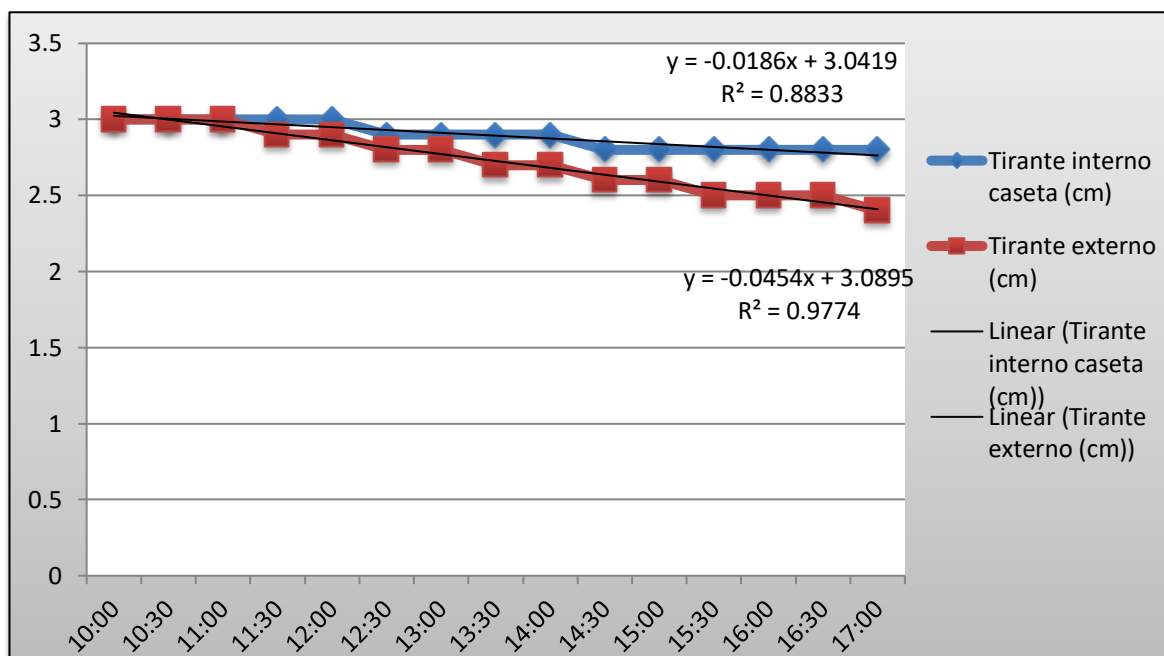


Figura A4.7 Diferencia de tirante (5 Mayo 2017)

Tabla A4.8 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (5 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	20.773	41.922	19.987	44.088
10:30	24.103	44.66	22.805	48.677
11:00	42.101	61.502	32.08	28.176
11:30	46.622	56.407	35.27	21.75
12:00	45.136	59.291	33.896	23.722
12:30	48.818	57.608	33.504	19.019
13:00	52.943	52.768	34.422	15
13:30	56.122	47.655	36.236	15
14:00	49.697	33.227	35.031	15
14:30	51.011	51.01	36.236	15
15:00	45.669	56.219	33.113	15
15:30	40.555	63.413	31.084	15
16:00	40.67	42.015	32.492	15
16:30	40.296	48.124	31.492	15
17:00	35.913	57.203	30.881	15

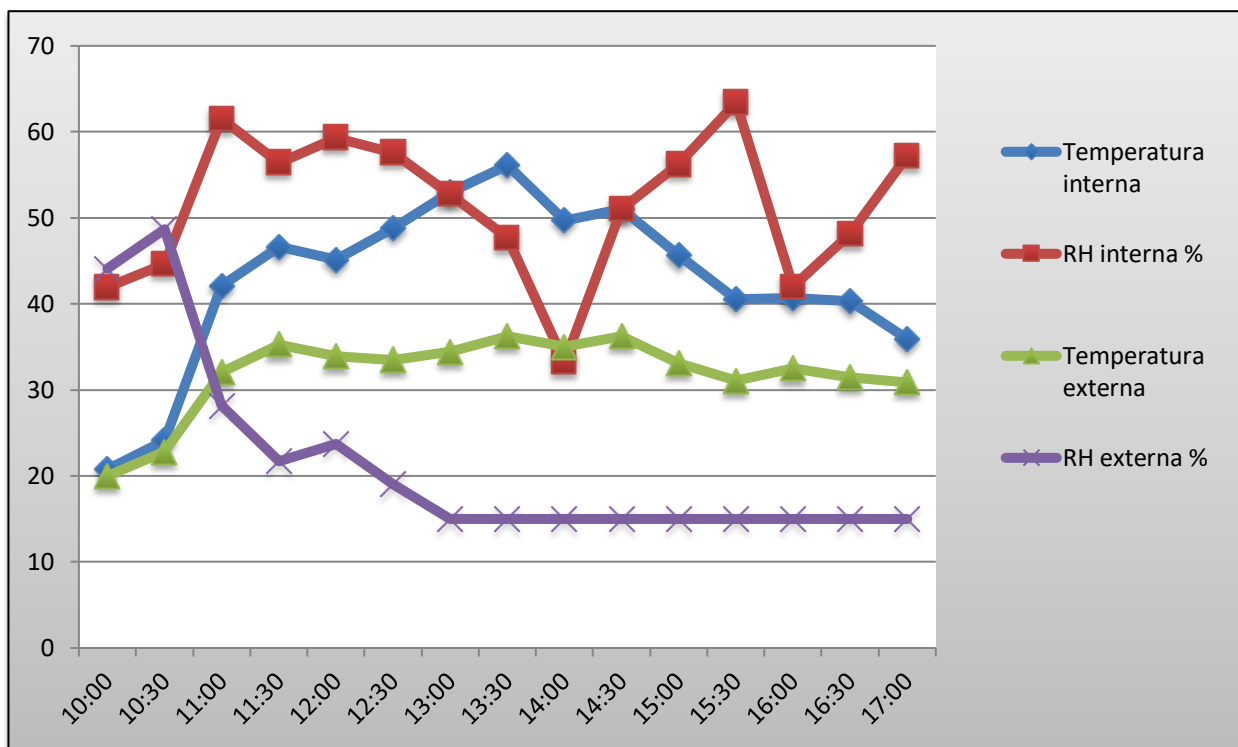


Figura A4.8 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (5 Mayo 2017)

Tabla A4.9 Radiación Solar (5 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	820
10:30	863
11:00	989
11:30	1000
12:00	1051
12:30	1051
13:00	1000
13:30	810
14:00	650
14:30	300
15:00	195
15:30	195
16:00	140
16:30	120
17:00	100

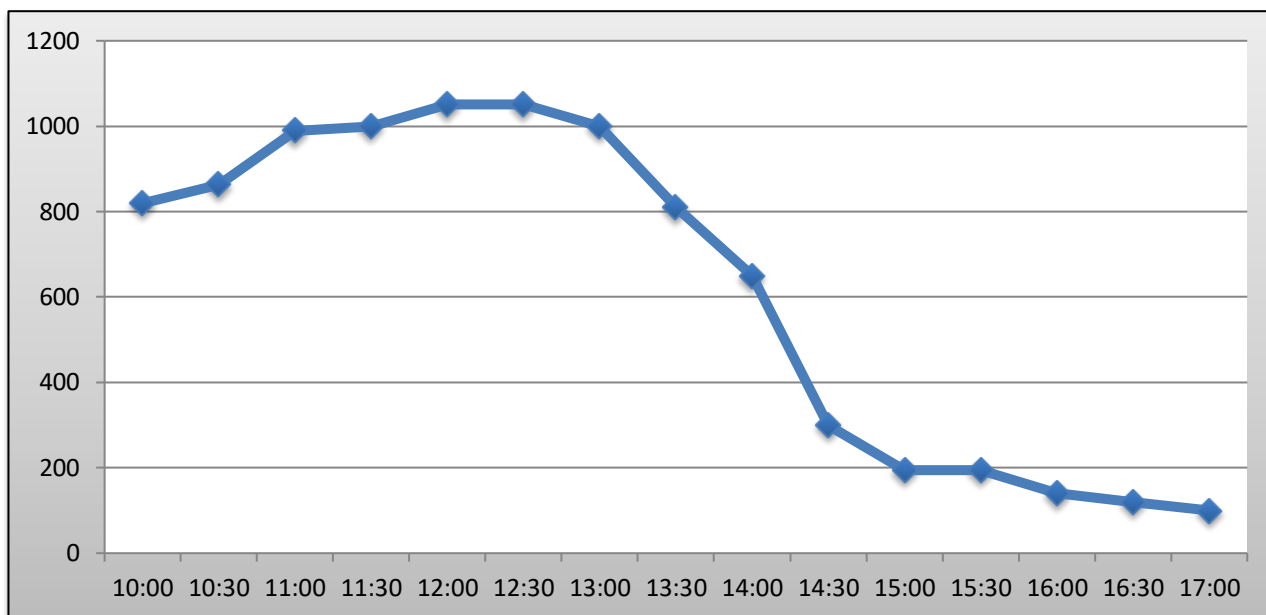


Figura A4.9 Radiación Solar (5 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.10, A4.11 y A4.12 corresponden a la experimentación realizada el día 8 de mayo de 2017.

Tabla A4.10 Diferencia de tirante (8 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno caseta (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	3
12:30	3	2.9
13:00	2.9	2.9
13:30	2.9	2.8
14:00	2.9	2.8
14:30	2.9	2.8
15:00	2.9	2.8
15:30	2.9	2.8
16:00	2.9	2.8
16:30	2.9	2.8
17:00	2.9	2.8

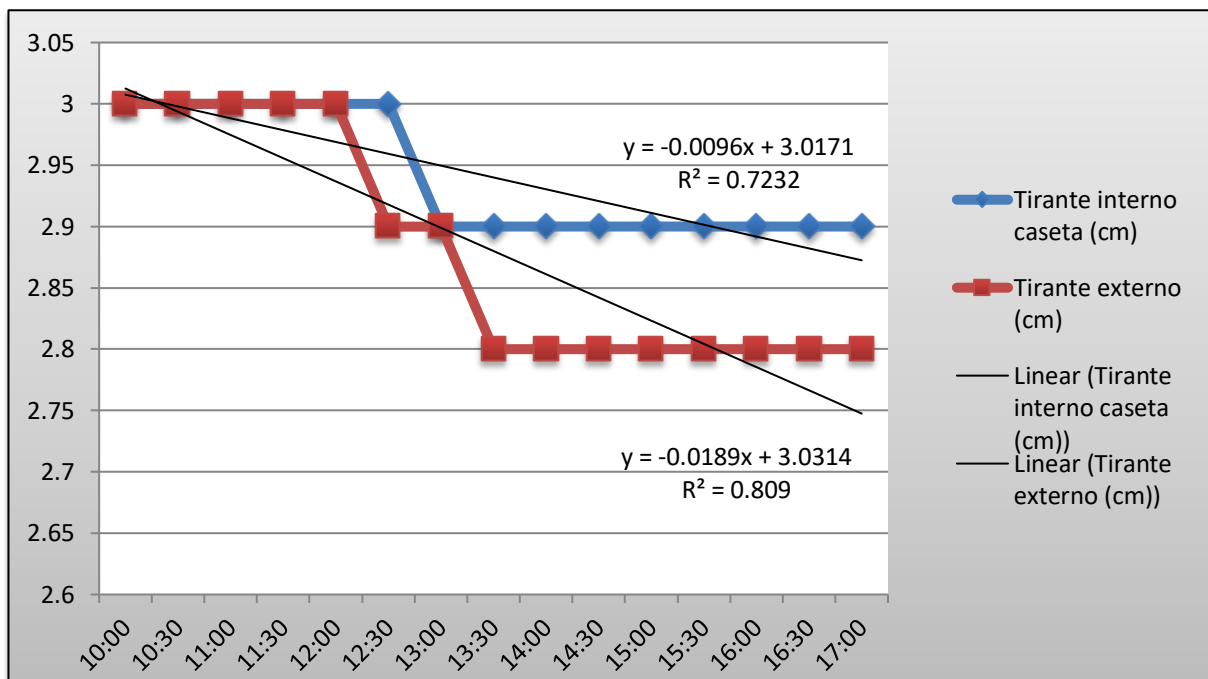


Figura A4.10 Diferencia de tirante (8 Mayo 2017)

Tabla A4.11 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (8 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna (°C)	RH interna (%)	Temperatura externa (°C)	RH externa (%)
10:00	24.803	46.254	26.94	39.505
10:30	46.43	15	29.916	28.276
11:00	55.344	15	32.175	24.594
11:30	56.358	15	33.131	21.638
12:00	58.794	15	35.448	18.041
12:30	58.007	15	37.755	16.108
13:00	55.809	15	37.921	16.55
13:30	53.273	15	37.838	17.557
14:00	43.598	32.128	33.157	21.64
14:30	40.153	41.199	31.484	23.569
15:00	45.104	34.278	32.924	22.119
15:30	39.498	26.873	31.663	23.231
16:00	32.183	28.427	26.965	41.946
16:30	30.704	28.557	29.29	39.019
17:00	28.847	28.599	29.165	40.602

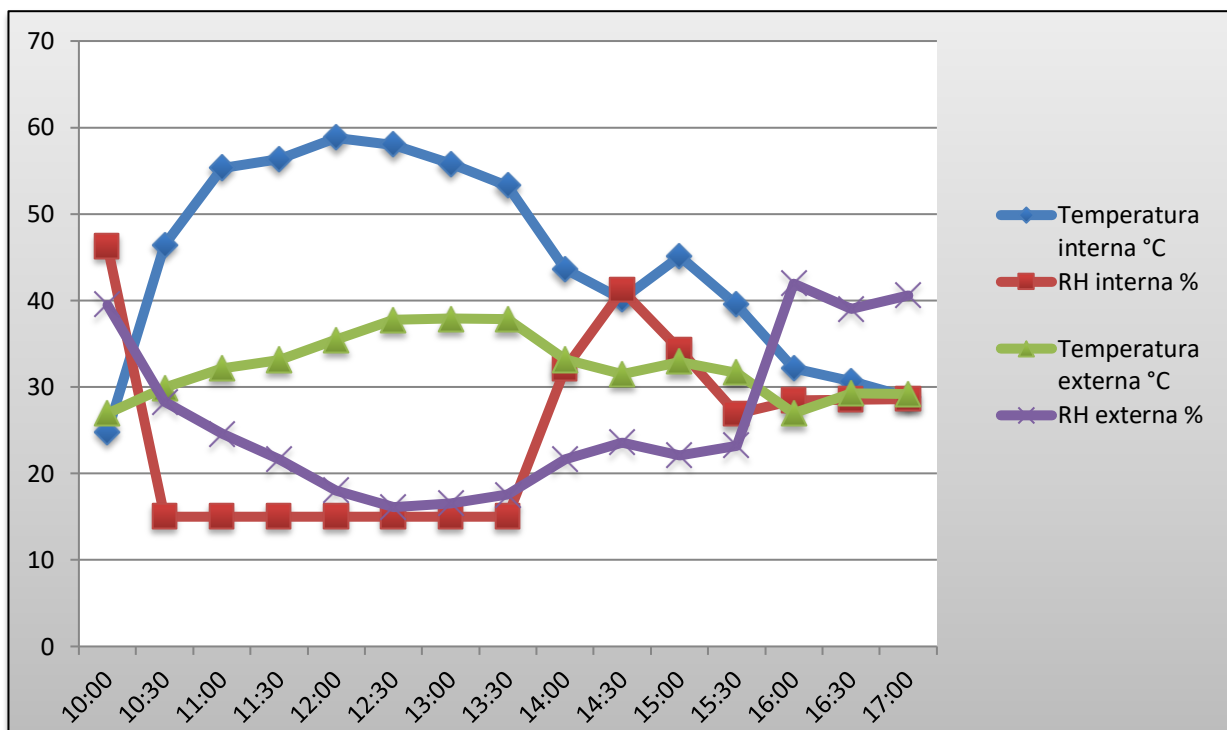
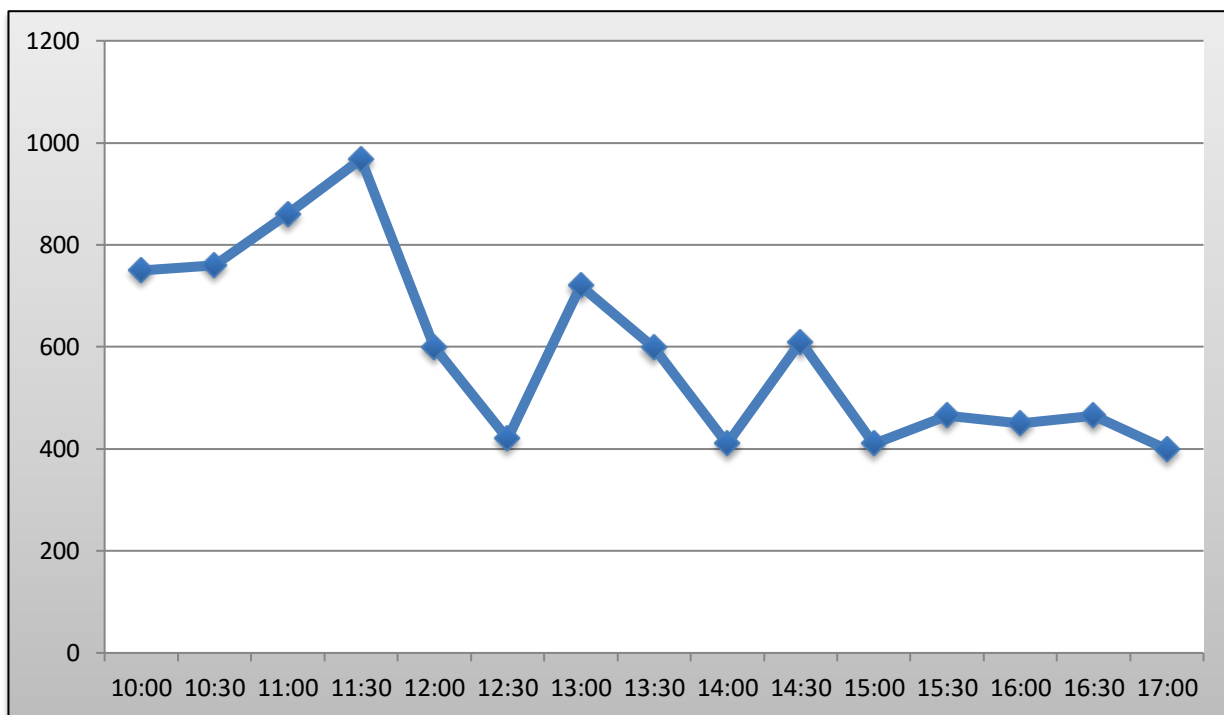


Figura A4.11 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (8 Mayo 2017)

Tabla A4.12 Radiación Solar (8 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	750
10:30	760
11:00	860
11:30	968
12:00	600
12:30	420
13:00	720
13:30	598
14:00	410
14:30	610
15:00	410
15:30	465
16:00	450
16:30	465
17:00	399





**Figura A4.12 Radiación Solar (8 Mayo 2017)**

Los datos presentados en las tablas A4.13, A4.14 y A4.15 corresponden a la experimentación realizada el día 11 de mayo de 2017.

**Tabla A4.13 Diferencia de tirante (11 Mayo 2017)**

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	2.9
12:30	3	2.9
13:00	2.9	2.9
13:30	2.9	2.9
14:00	2.9	2.8
14:30	2.8	2.8
15:00	2.8	2.7
15:30	2.8	2.7
16:00	2.7	2.6
16:30	2.7	2.6
17:00	2.7	2.5

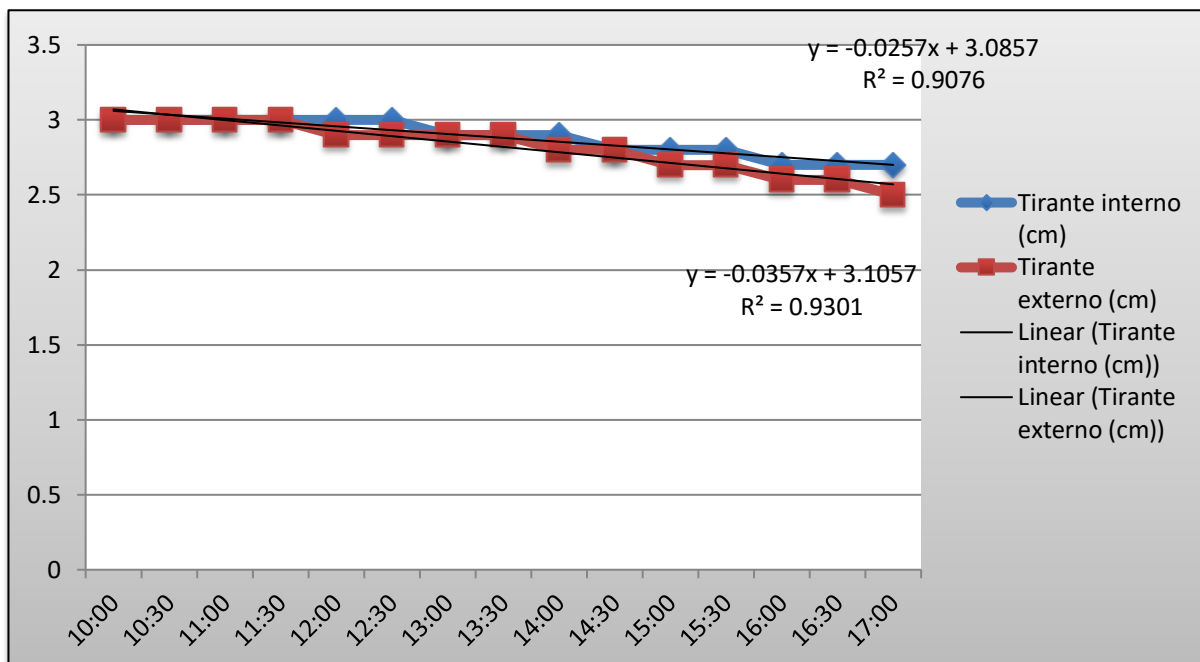


Figura A4.13 Diferencia de tirante (11 Mayo 2017)

Tabla A4.14 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (11 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	27.087	42.419	25.336	47.961
10:30	40.862	54.383	34.978	16.922
11:00	45.94	52.471	41.221	15
11:30	47.711	49.929	39.64	15
12:00	50.543	34.11	43.841	15
12:30	55.793	31.053	41.777	15
13:00	56.224	30.285	39.187	15
13:30	52.6	36.683	38.878	15
14:00	54.602	35.363	38.626	15
14:30	52.059	38.974	38.18	15
15:00	54.792	35.595	37.545	15
15:30	49.888	39.008	35.137	15
16:00	53.184	28.305	34.765	15
16:30	51.101	33.337	34.053	15
17:00	42.833	44.456	32.569	15

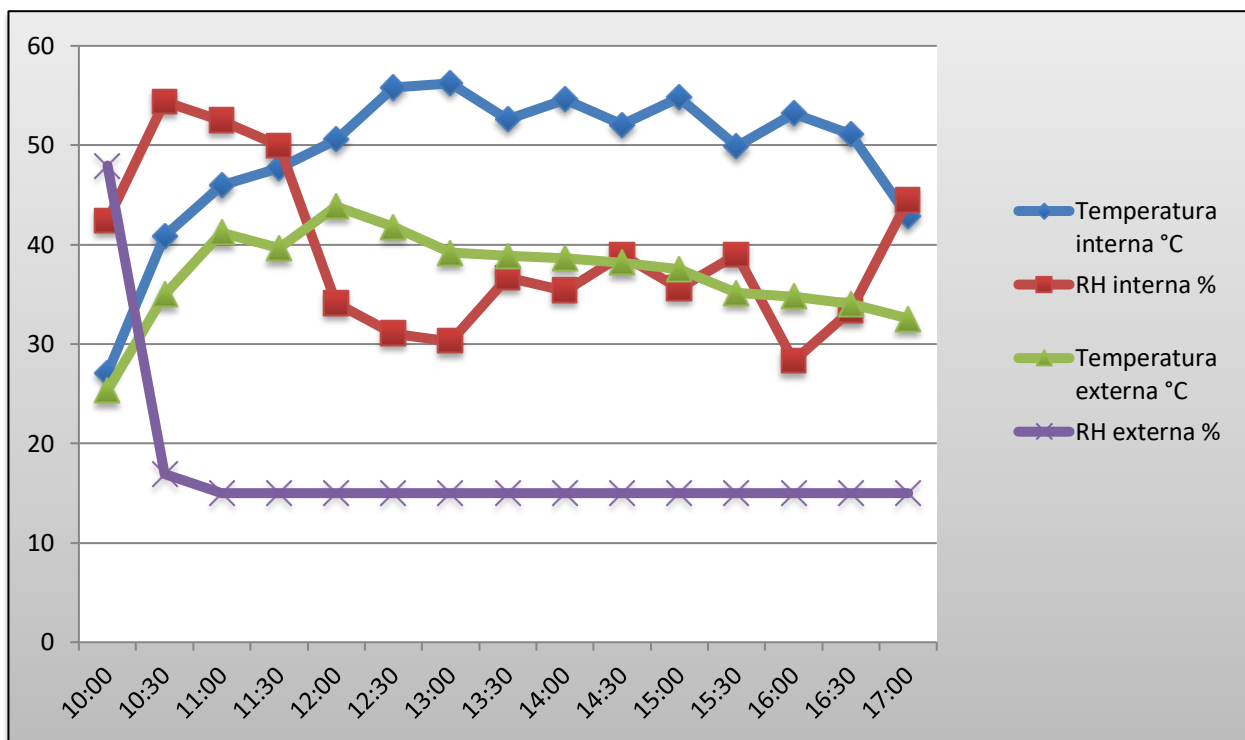


Figura A4.14 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (11 Mayo 2017)

Tabla A4.15 Radiación Solar (11 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	834
10:30	715
11:00	765
11:30	587
12:00	735
12:30	410
13:00	395
13:30	298
14:00	537
14:30	200
15:00	187
15:30	175
16:00	305
16:30	233
17:00	300

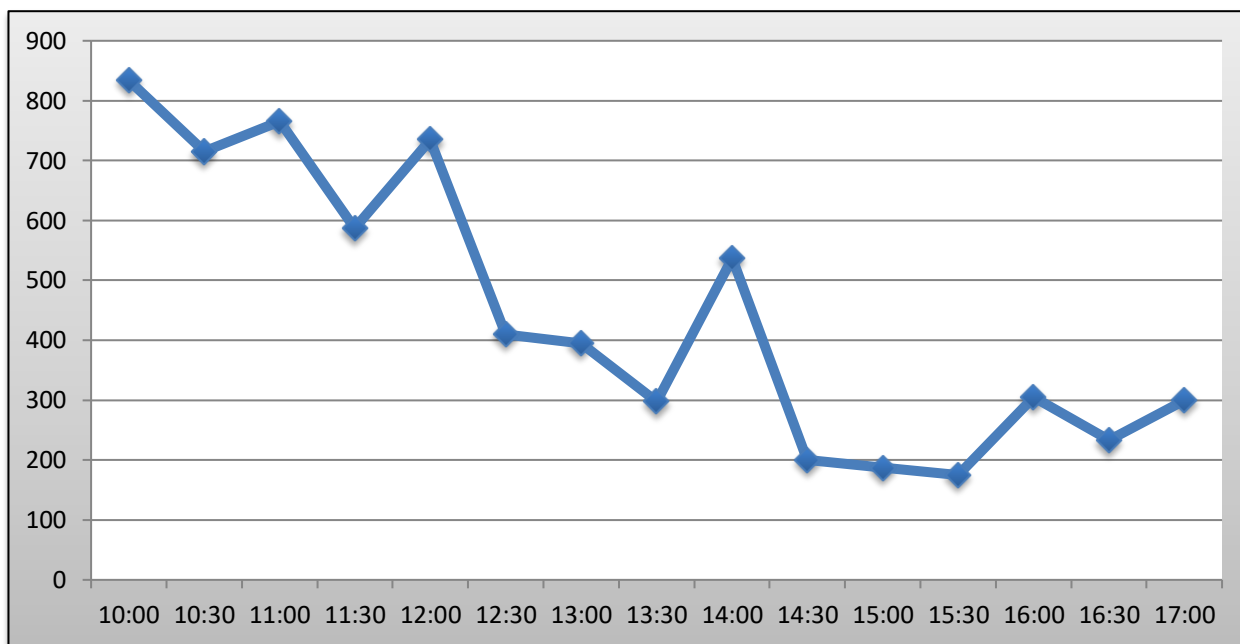


Figura A4.15 Radiación Solar (11 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.16, A4.17 y A4.18 corresponden a la experimentación realizada el día 12 de mayo de 2017.

Tabla A4.16 Diferencia de tirante (12 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	3
12:30	3	2.9
13:00	2.9	2.9
13:30	2.9	2.9
14:00	2.9	2.8
14:30	2.9	2.8
15:00	2.9	2.7
15:30	2.9	2.7
16:00	2.8	2.6
16:30	2.8	2.6
17:00	2.8	2.5

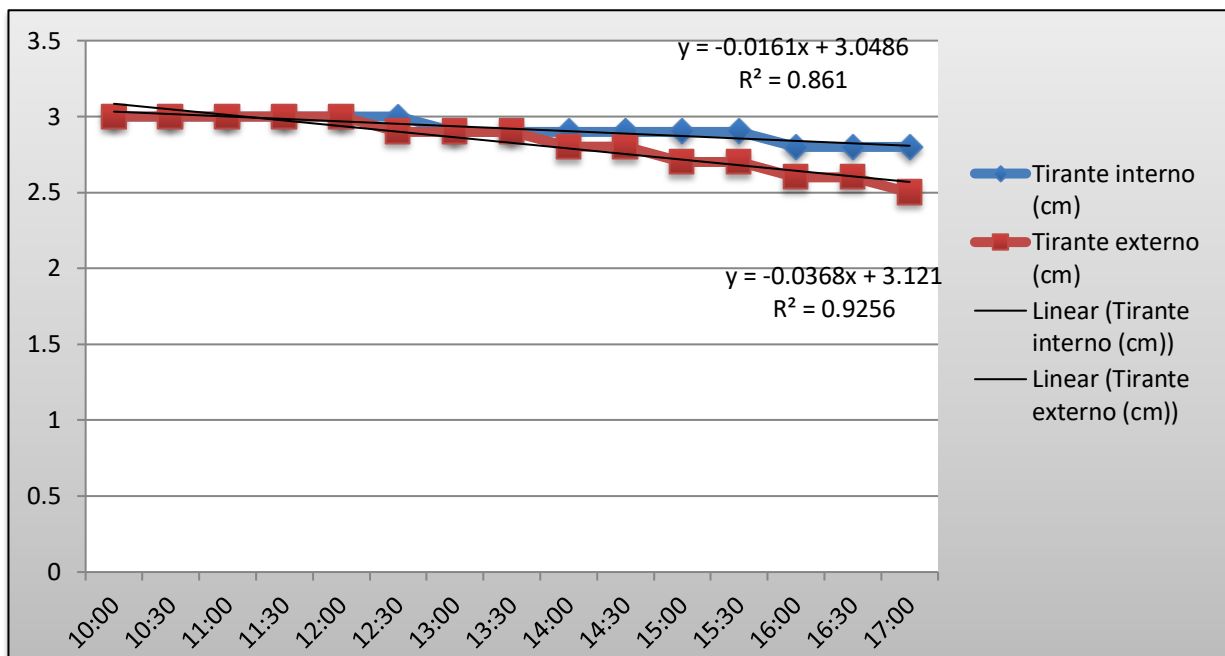


Figura A4.16 Diferencia de tirante (12 Mayo 2017)

Tabla A4.17 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (12 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	25.817	45.918	24.055	45.474
10:30	32.433	51.677	33.582	23.832
11:00	41.913	60.121	37.051	15
11:30	46.609	56.104	42.22	15
12:00	47.255	53.786	39.811	15
12:30	50.197	50.135	46.59	15
13:00	50.961	44.886	35.297	15
13:30	48.637	43.762	31.798	20.491
14:00	42.714	55.165	30.805	22.827
14:30	39.177	54.48	31.262	22.259
15:00	44.012	39.296	33.425	17.754
15:30	53.331	30.966	32.234	15.441
16:00	52.239	32.248	32.08	15
16:30	45.687	32.663	31.696	15
17:00	35.342	25.937	30.78	15

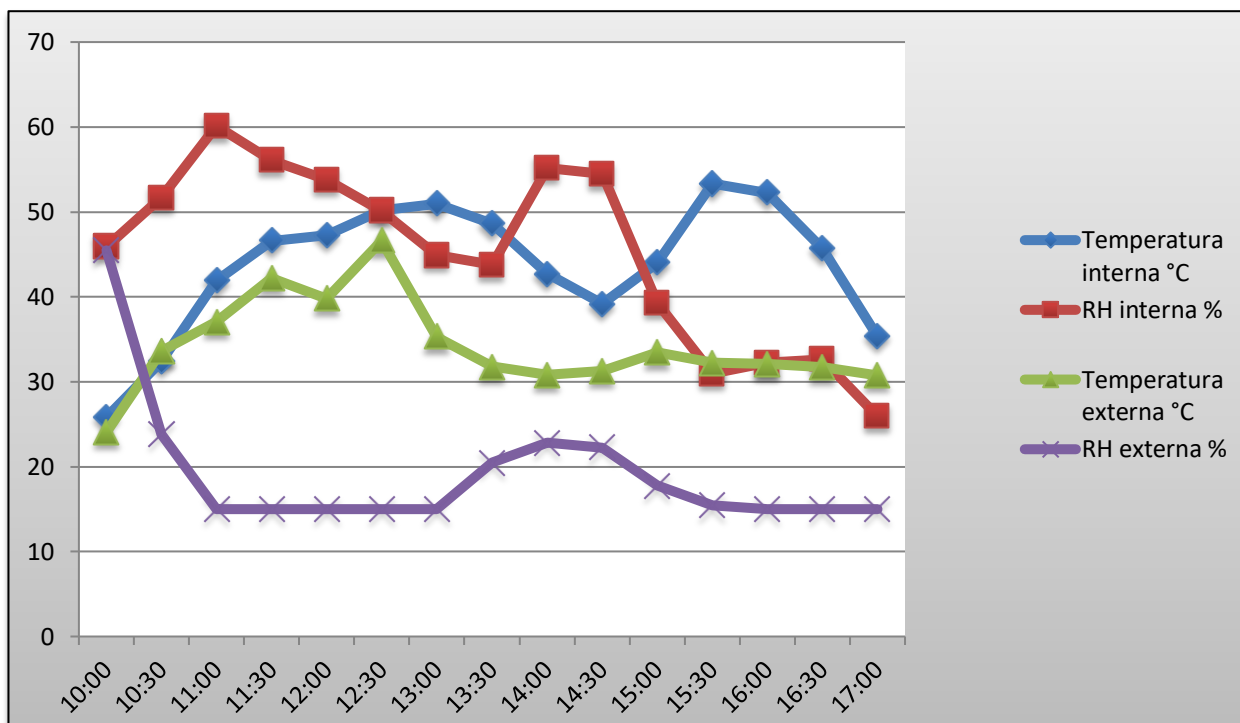
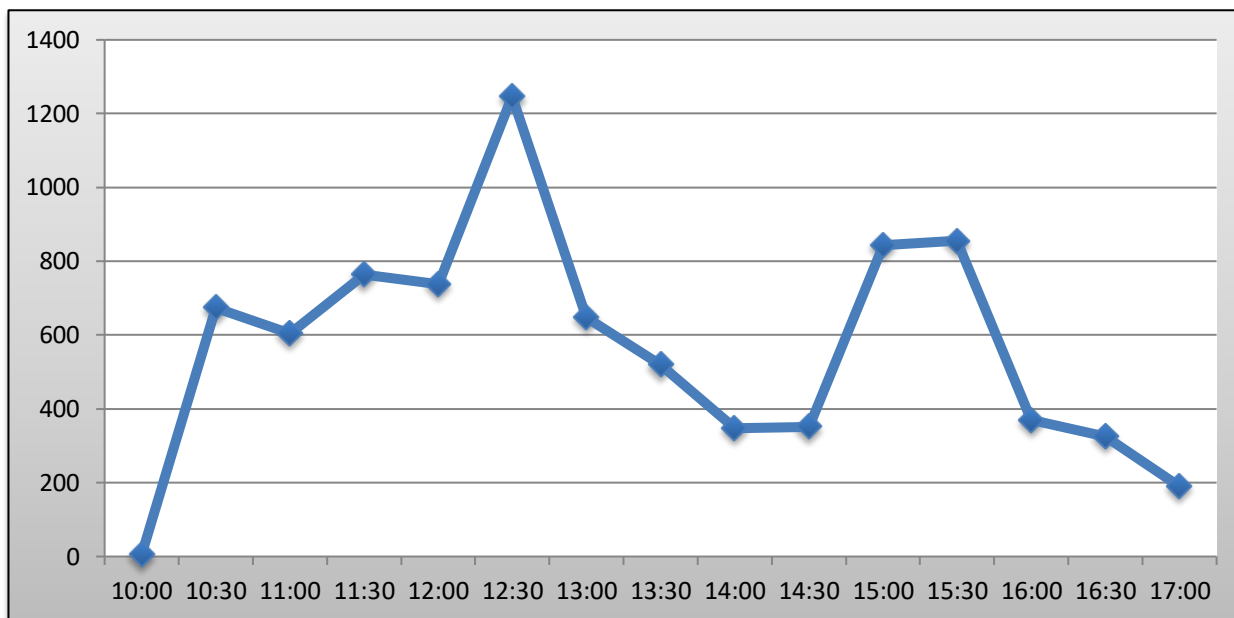


Figura A4.17 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (12 Mayo 2017)

Tabla A4.18 Radiación Solar (12 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	5.6
10:30	674.4
11:00	604.4
11:30	764.4
12:00	738.1
12:30	1,246.90
13:00	648.1
13:30	519.4
14:00	348.1
14:30	351.9
15:00	844.4
15:30	855.6
16:00	369.4
16:30	325.6
17:00	190.6



**Figura A4.18 Radiación Solar (12 Mayo 2017)**

Los datos presentados en las tablas A4.19, A4.20 y A4.21 corresponden a la experimentación realizada el día 16 de mayo de 2017.

**Tabla A4.19 Diferencia de tirante (16 Mayo 2017)**

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	3
12:30	3	2.9
13:00	2.9	2.9
13:30	2.9	2.9
14:00	2.9	2.9
14:30	2.9	2.8
15:00	2.9	2.8
15:30	2.9	2.8
16:00	2.9	2.8
16:30	2.8	2.7
17:00	2.8	2.7

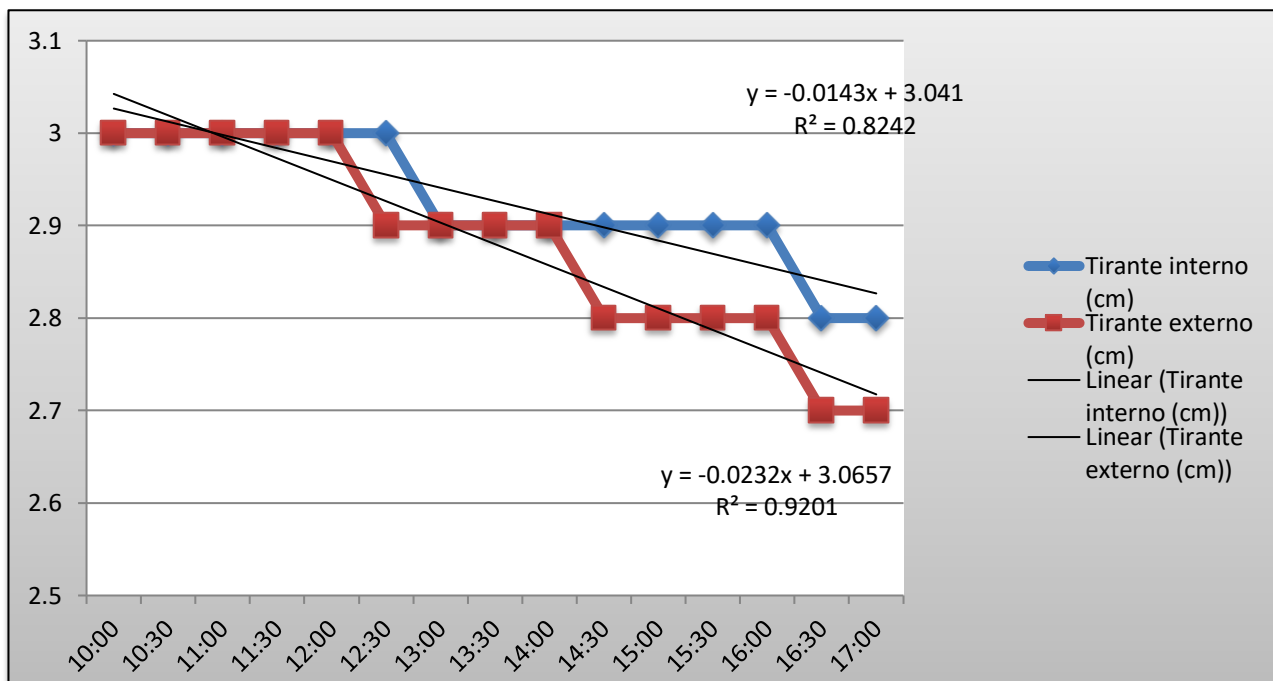


Figura A4.19 Diferencia de tirante (16 Mayo 2017)

Tabla A4.20 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (16 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	24.195	47.392	28.997	46.311
10:30	36.498	28.962	36.507	22.015
11:00	44.226	26.571	38.738	18.895
11:30	49.683	22.005	41.455	15
12:00	52.275	22.31	44.423	15
12:30	55.599	22.252	48.517	15
13:00	58.526	22.466	50.418	15
13:30	55.059	27.125	35.324	15
14:00	53.813	31.837	35.244	15
14:30	45.123	42.896	32.029	18.374
15:00	50.961	36.247	33.582	15
15:30	55.638	22.7	46.048	15
16:00	49.275	30.033	40.902	15
16:30	52.239	26.487	42.457	15
17:00	48.371	24.84	40.096	15



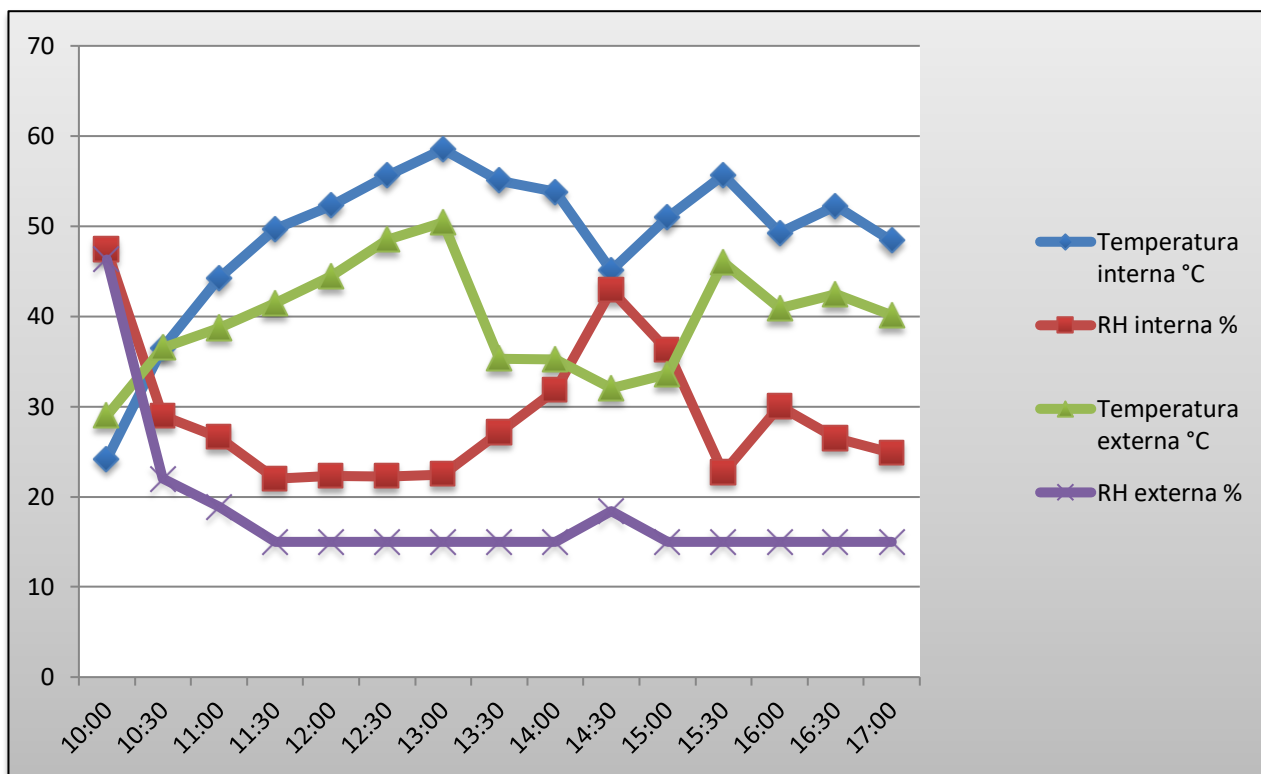


Figura A4.20 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (16 Mayo 2017)

Tabla A4.21 Radiación Solar (16 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	0.6
10:30	653.1
11:00	733.1
11:30	884.4
12:00	921.9
12:30	1,050.60
13:00	1,016.90
13:30	294.4
14:00	460.6
14:30	338.1
15:00	945.6
15:30	861.9
16:00	389.4
16:30	638.1
17:00	511.9

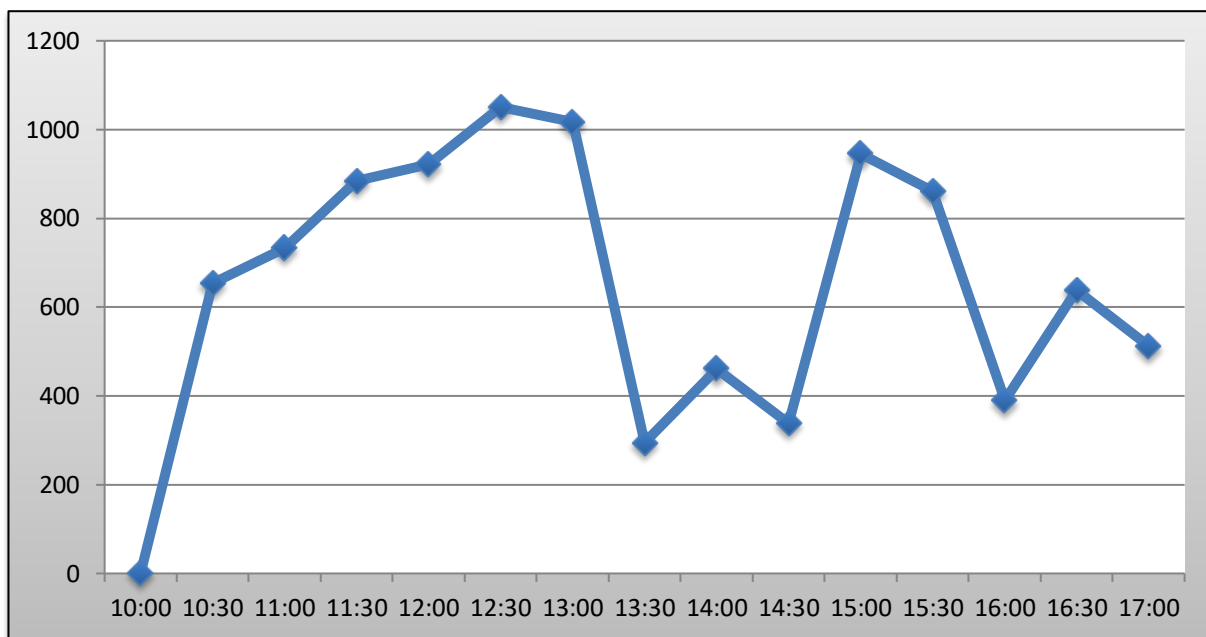


Figura A4.21 Radiación Solar (16 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.22, A4.23 y A4.24 corresponden a la experimentación realizada el día 18 de mayo de 2017

Tabla A4.22 Diferencia de tirante (18 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	2.9
12:30	3	2.9
13:00	2.9	2.8
13:30	2.9	2.8
14:00	2.9	2.7
14:30	2.8	2.7
15:00	2.8	2.6
15:30	2.8	2.6
16:00	2.7	2.5
16:30	2.7	2.5
17:00	2.7	2.5

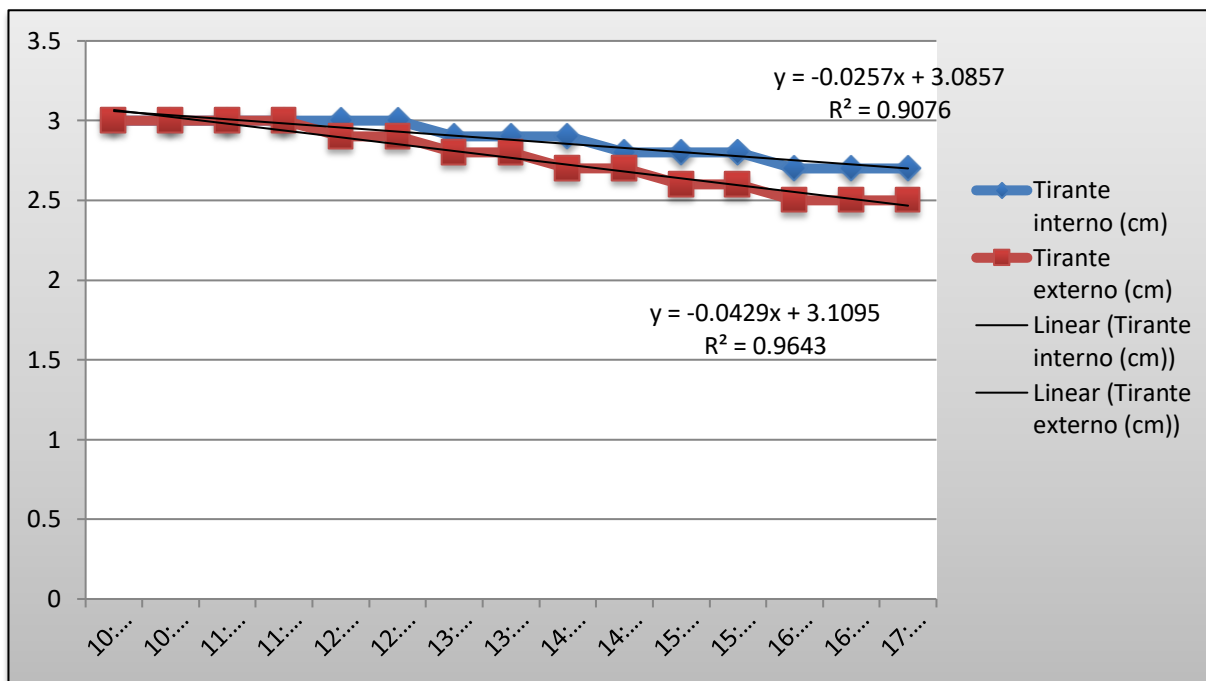


Figura A4.22 Diferencia de tirante (18 Mayo 2017)

Tabla A4.23 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (18 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	30.874	57.477	31.901	30.468
10:30	41.414	59.592	35.967	22.221
11:00	44.196	58.6	38.486	17.026
11:30	46.577	55.4	40.125	15
12:00	49.242	35.948	42.368	15
12:30	53.701	36.856	37.352	15.077
13:00	55.988	36.494	36.291	15
13:30	55.949	38.462	36.833	15
14:00	57.867	38.681	36.942	15
14:30	56.858	40.728	36.534	15
15:00	55.251	42.337	36.779	15
15:30	53.331	37.713	35.725	15
16:00	45.94	33.038	33.269	15.285
16:30	38.952	41.412	32.802	19.105
17:00	34.44	52.14	31.492	19.475

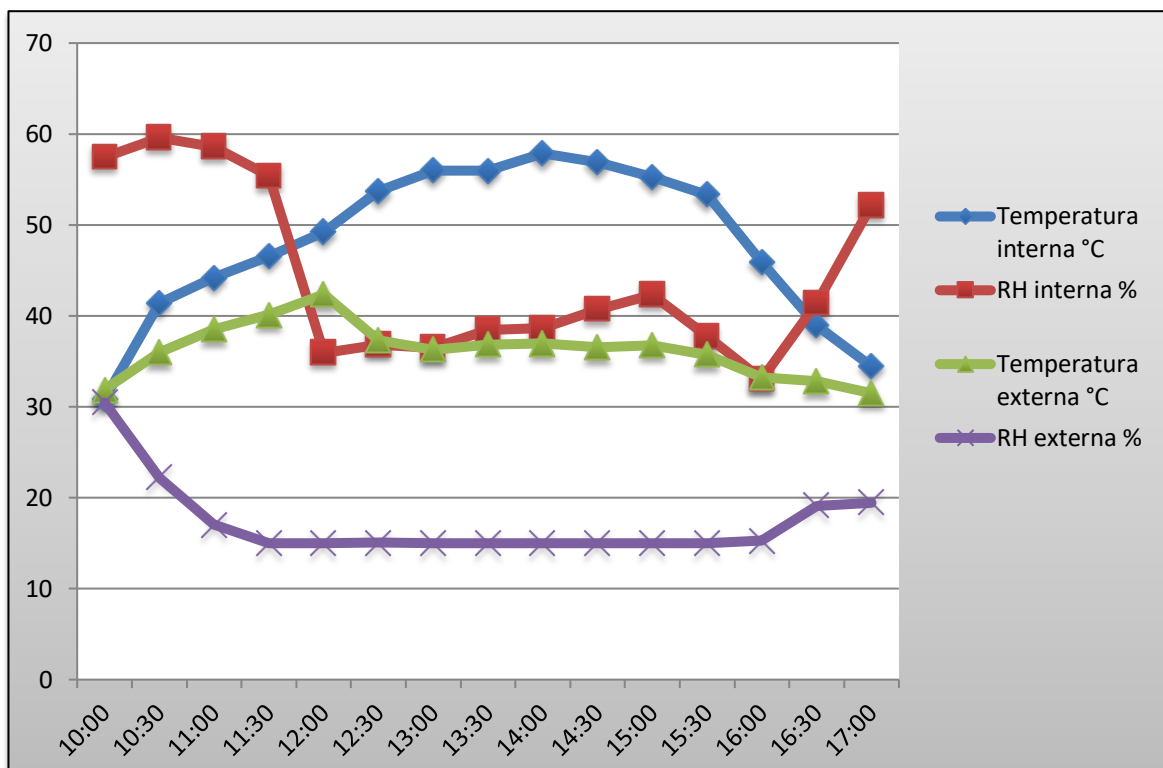


Figura A4.23 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (18 Mayo 2017)

Tabla A4.24 Radiación Solar (18 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	549.4
10:30	640.6
11:00	723.1
11:30	809.4
12:00	873.1
12:30	1,016.90
13:00	990.6
13:30	966.9
14:00	973.1
14:30	824.4
15:00	856.9
15:30	853.1
16:00	219.4
16:30	166.9
17:00	160.5

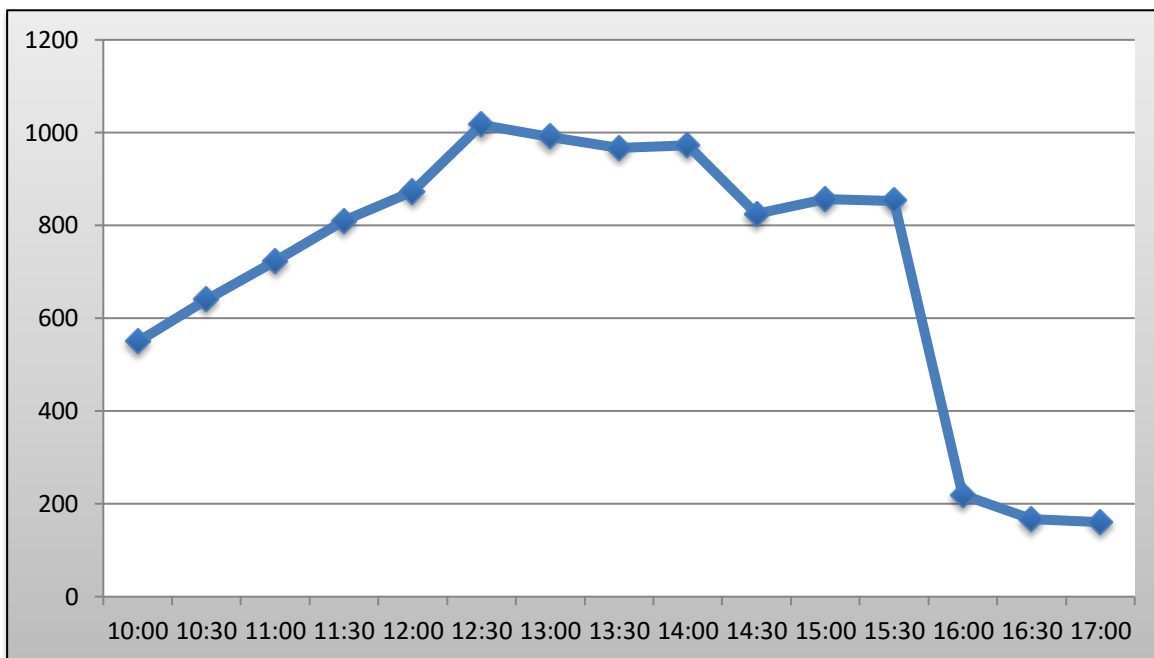


Figura A4.24 Radiación Solar (18 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.25, A4.26 y A4.27 corresponden a la experimentación realizada el día 19 de mayo de 2017.

Tabla A4.25 Diferencia de tirante (19 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	2.9
12:30	3	2.9
13:00	2.9	2.8
13:30	2.9	2.8
14:00	2.8	2.7
14:30	2.8	2.7
15:00	2.8	2.6
15:30	2.7	2.6
16:00	2.7	2.5
16:30	2.6	2.5
17:00	2.6	2.5

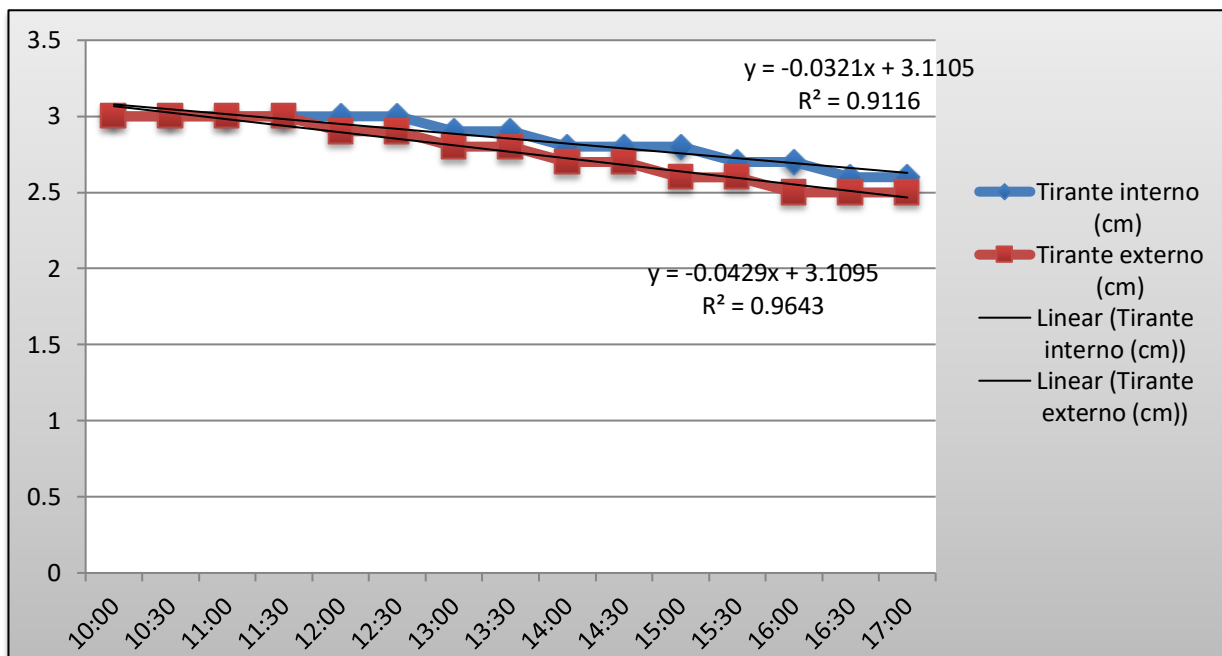


Figura A4.25 Diferencia de tirante (19 Mayo 2017)

Tabla A4.26 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (19 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	29.096	42.731	26.695	39.082
10:30	46.815	15	32.846	25.479
11:00	52.615	15	36.335	20.199
11:30	53.089	15.117	38.812	17.896
12:00	53.717	15	40.833	16.696
12:30	57.599	15	42.505	14.804
13:00	61.113	15	43.073	14.242
13:30	63.104	15	44.503	12.753
14:00	59.766	19.218	46.067	11.254
14:30	58.668	15	46.963	11.288
15:00	61.826	15	46.995	10.317
15:30	65.445	15	48.437	9.917
16:00	65.891	15	47.908	9.899
16:30	43.085	37.979	37.893	15.862
17:00	35.859	54.374	35.155	18.24

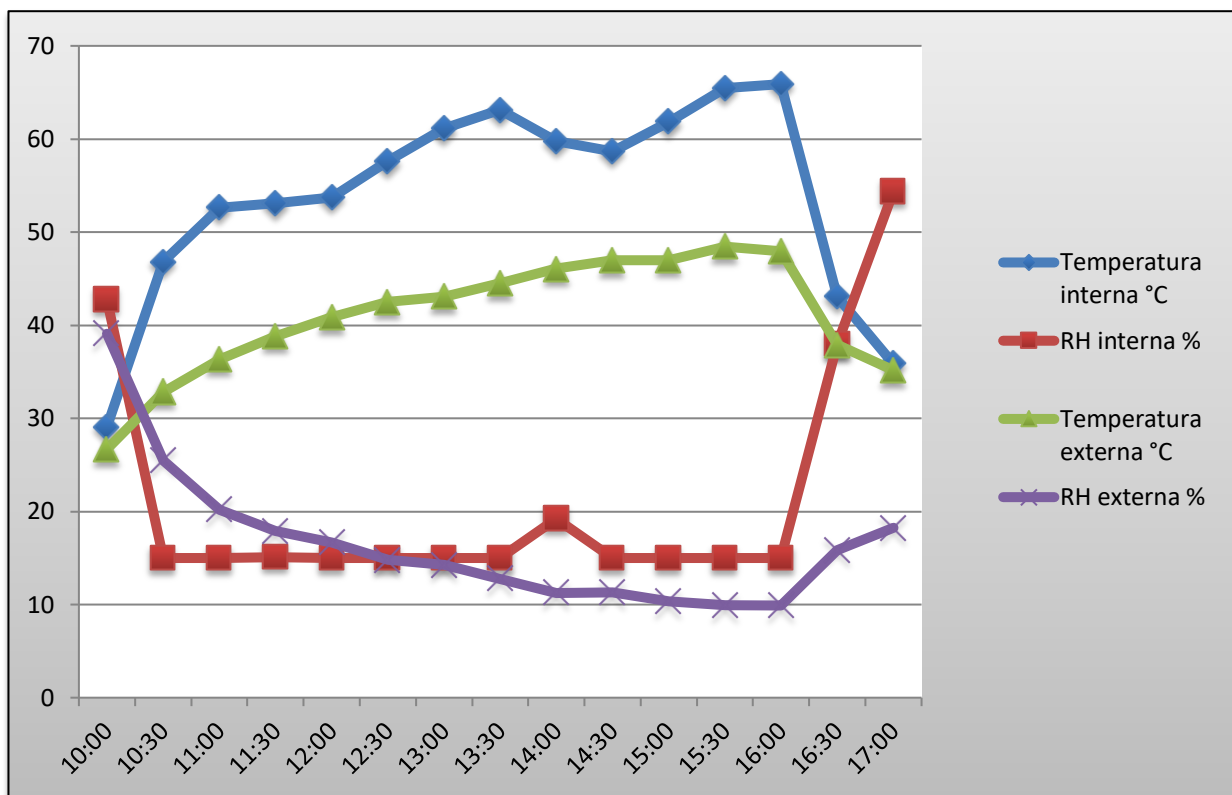


Figura A4.26 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (19 Mayo 2017)

Tabla A4.27 Radiación Solar (19 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	549.4
10:30	673.1
11:00	768.1
11:30	841.9
12:00	903.1
12:30	948.1
13:00	993.1
13:30	1,008.10
14:00	1,005.60
14:30	1,004.40
15:00	995.6
15:30	935.6
16:00	884.4
16:30	115.6
17:00	46.9

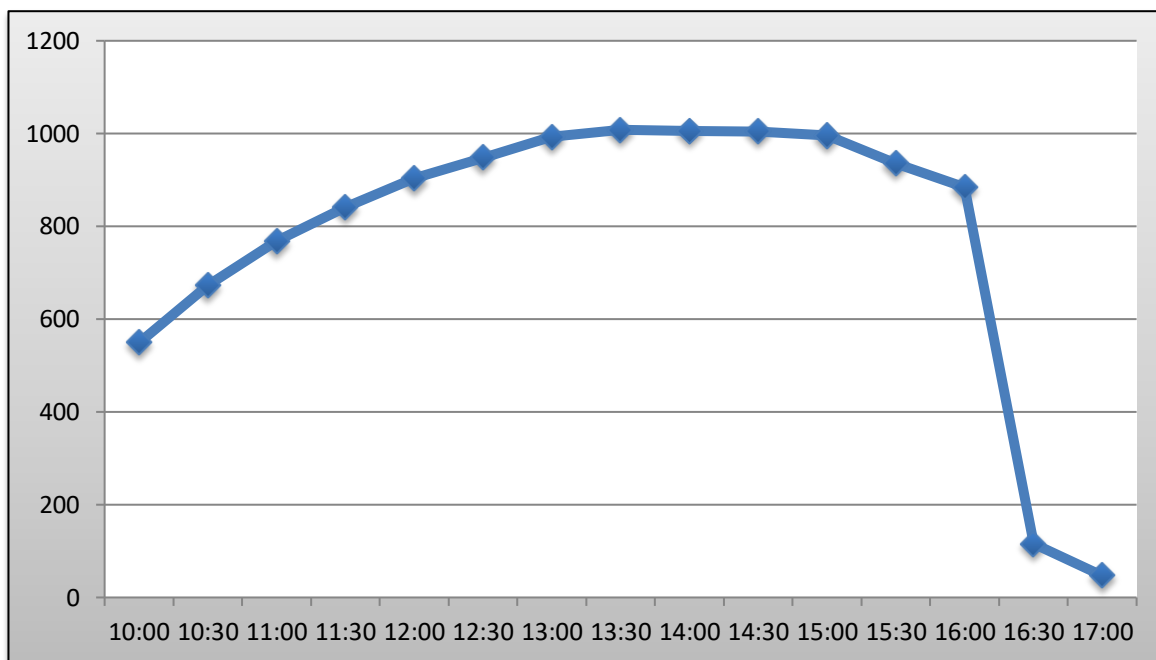


Figura A4.27 Radiación Solar (19 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.28, A4.29 y A4.30 corresponden a la experimentación realizada el día 22 de mayo de 2017.

Tabla A.428 Diferencia de tirante (22 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	3
12:30	3	3
13:00	3	2.9
13:30	2.9	2.9
14:00	2.9	2.8
14:30	2.8	2.8
15:00	2.8	2.7
15:30	2.7	2.6
16:00	2.7	2.6
16:30	2.6	2.5
17:00	2.6	2.5



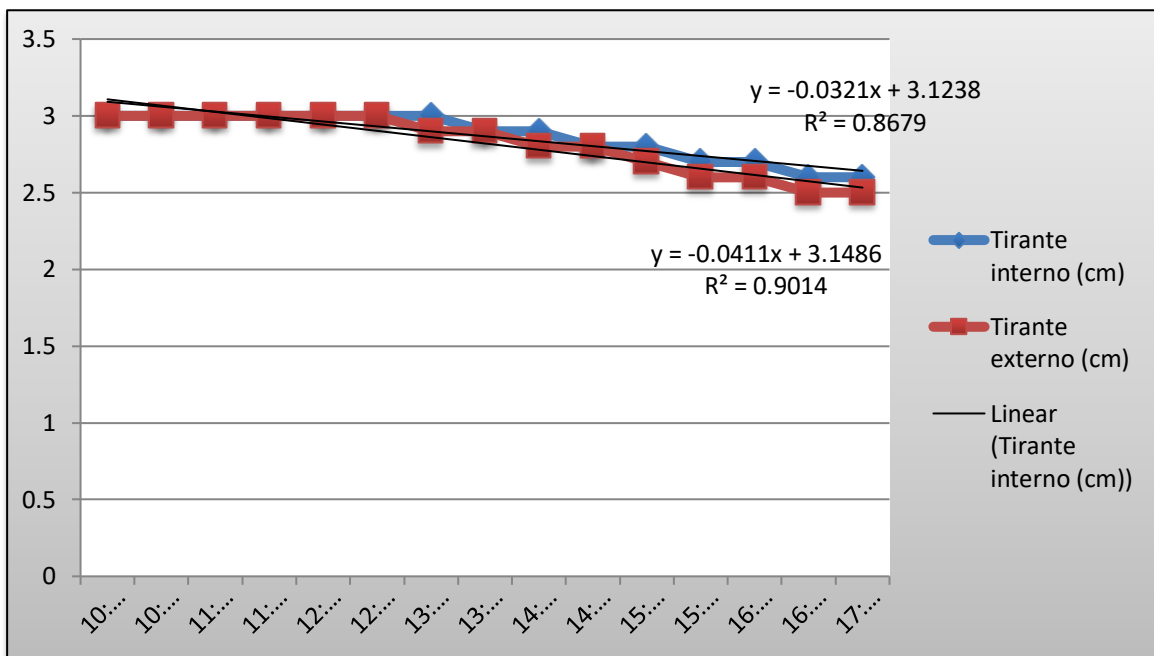


Figura A4.28 Diferencia de tirante (22 Mayo 2017)

Tabla A4.29 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (22 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	27.727	40.382	27.437	40.738
10:30	35.422	37.005	35.779	21.998
11:00	41.385	48.44	38.962	15
11:30	47.613	48.113	42.516	15
12:00	50.717	44.477	43.537	15
12:30	52.455	38.835	46.622	15
13:00	54.225	23.463	43.659	15
13:30	55.677	34.089	41.748	15
14:00	56.46	38.833	40.383	40.738
14:30	56.698	40.961	39.498	21.998
15:00	56.46	42.18	38.319	15
15:30	56.067	30.017	35.725	15
16:00	55.059	30.958	34.871	15
16:30	54.83	34.016	34.871	15
17:00	49.377	38.5	32.234	15

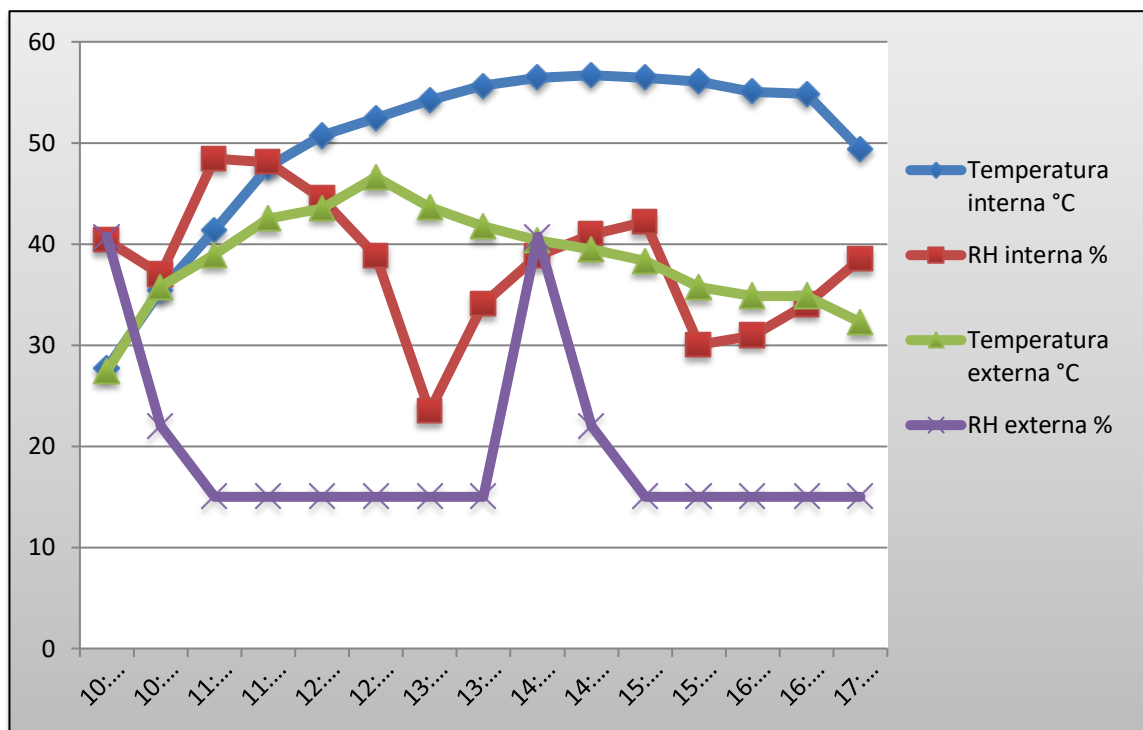
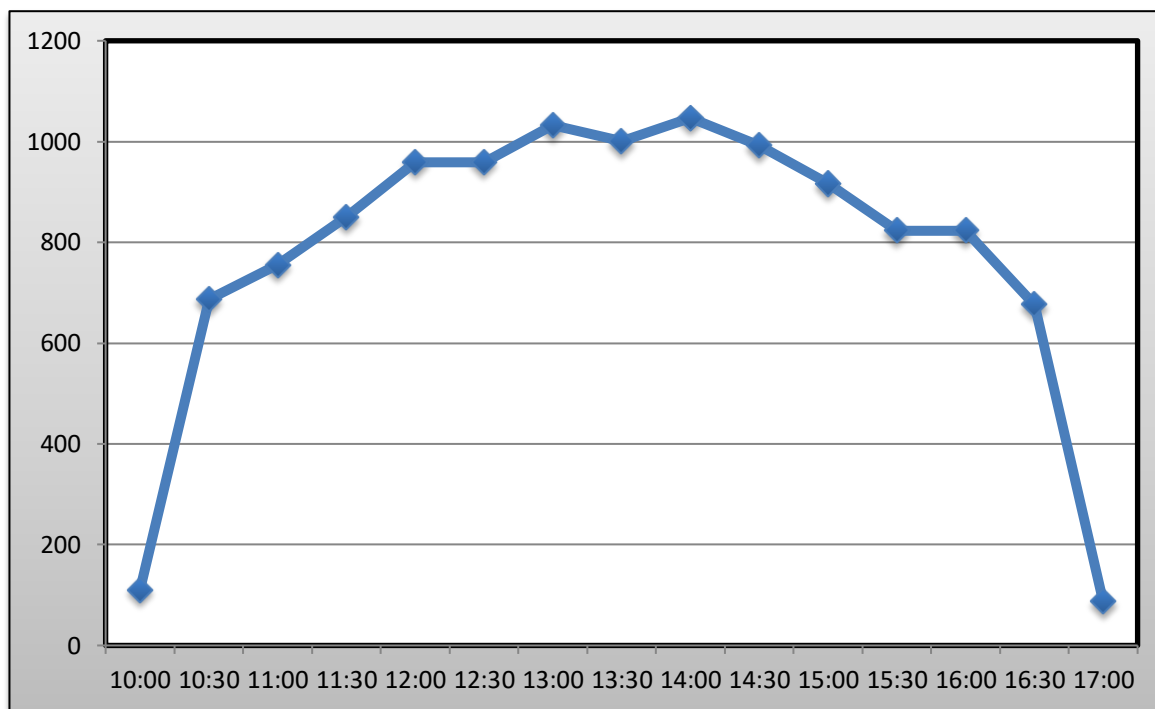


Figura A4.29 Diferencia de Temperatura y Humedad relativa (22 Mayo 2017)

Tabla A4.30 Radiación Solar (22 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	110.3
10:30	686.9
11:00	755.6
11:30	850.6
12:00	959.4
12:30	959.4
13:00	1,031.90
13:30	1,000.60
14:00	1,046.90
14:30	991.9
15:00	916.9
15:30	823.1
16:00	823.1
16:30	675.6
17:00	86.9



**Figura A4.30 Radiación Solar (22 Mayo 2017)**

Los datos presentados en las tablas A4.31, A4.32 y A4.33 corresponden a la experimentación realizada el día 23 de mayo de 2017.

**Tabla A4.31 Diferencia de tirante (23 Mayo 2017)**

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	2.9
12:30	2.9	2.9
13:00	2.9	2.8
13:30	2.8	2.8
14:00	2.8	2.7
14:30	2.8	2.7
15:00	2.7	2.6
15:30	2.7	2.6
16:00	2.7	2.5
16:30	2.7	2.5
17:00	2.6	2.4

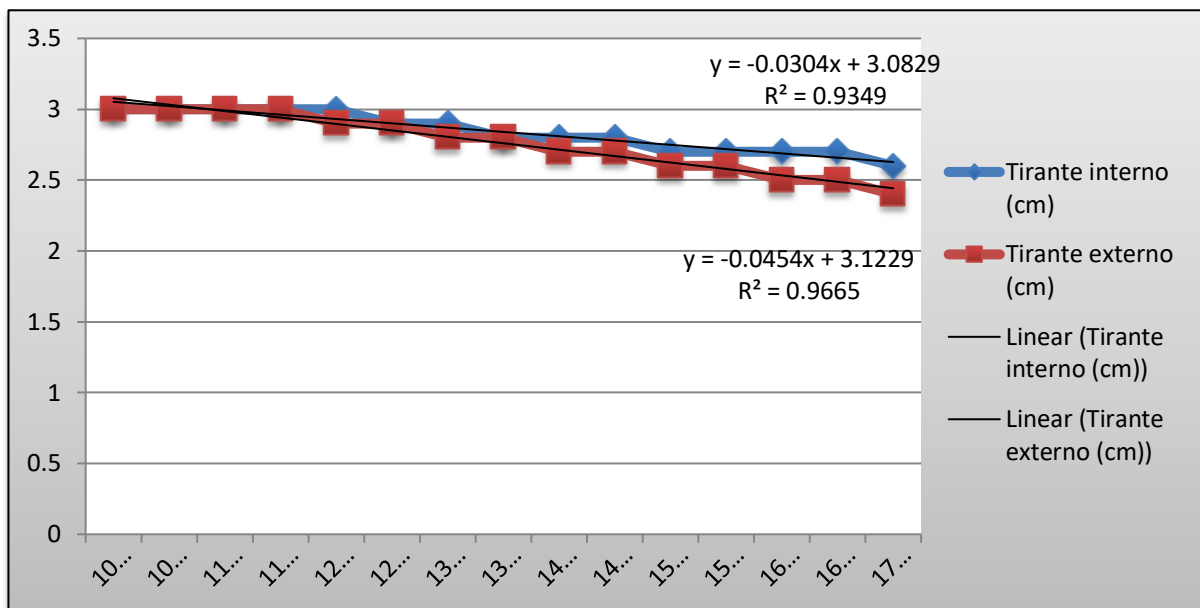


Figura A4.31 Diferencia de tirante (23 Mayo 2017)

Tabla A4.32 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (23 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	28.773	41.471	26.622	44.359
10:30	44.024	51.28	31.74	28.072
11:00	49.868	44.745	34.44	24.048
11:30	50.906	43.397	35.931	20.959
12:00	52.398	44.862	39.121	14.867
12:30	55.654	37.401	37.838	13.645
13:00	57.721	15	41.327	12.402
13:30	62.187	20.331	41.473	10.453
14:00	59.425	29.739	40.804	10.908
14:30	55.306	36.126	38.588	11.779
15:00	58.213	31.22	35.823	12.033
15:30	61.781	15	36.039	11.168
16:00	62.414	15	34.572	12.273
16:30	58.919	15	33.027	13.292
17:00	58.544	15.439	32.691	15.252

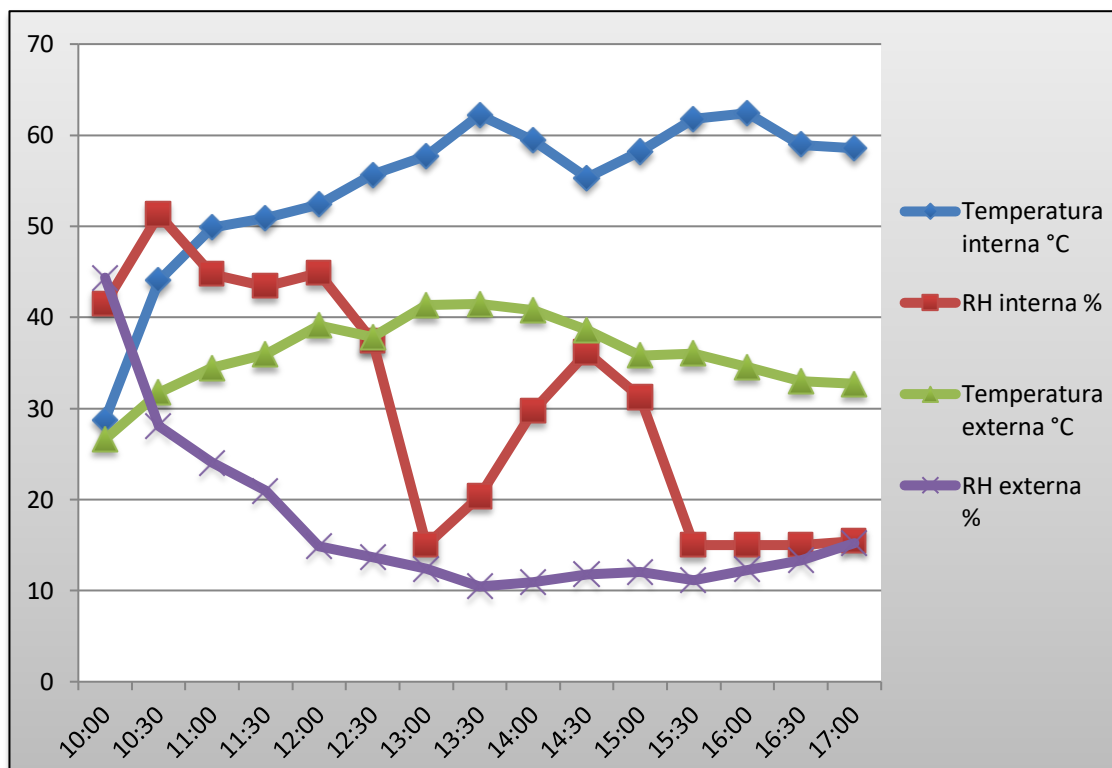


Figura A4.32 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (23 Mayo 2017)

Tabla A4.33 Radiación Solar (23 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	144.4
10:30	695.6
11:00	744.4
11:30	866.9
12:00	953.1
12:30	1,024.40
13:00	1,013.10
13:30	1,073.10
14:00	1,023.10
14:30	726.9
15:00	909.4
15:30	885.6
16:00	804.4
16:30	623.1
17:00	594.4

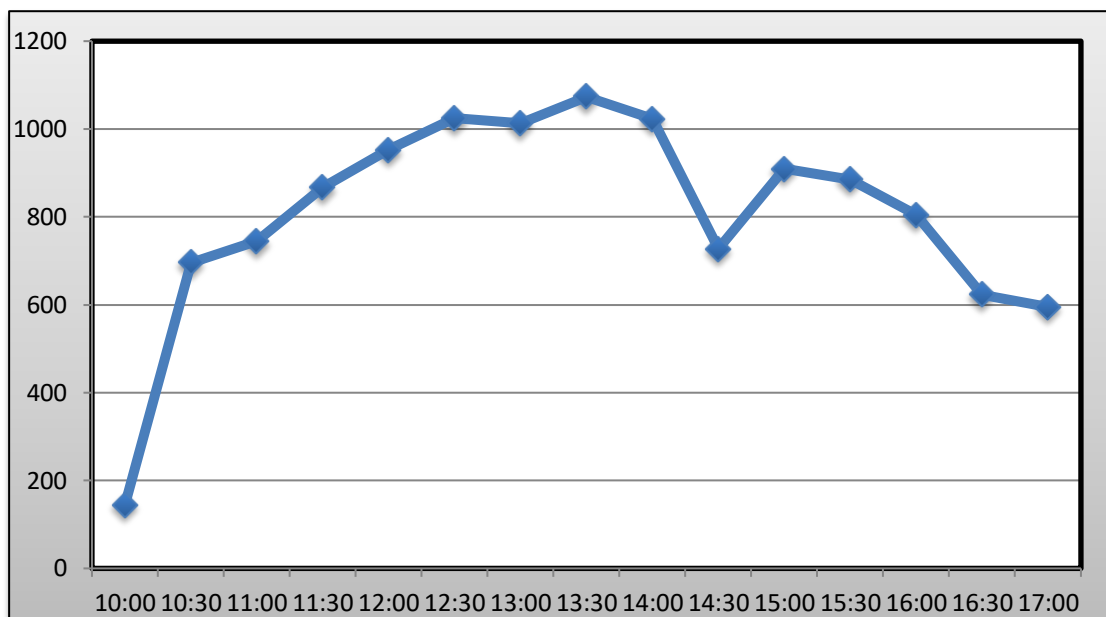


Figura A4.33 Radiación Solar (23 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.34, A4.35 y A4.36 corresponden a la experimentación realizada el día 24 de mayo de 2017.

Tabla A4.34 Diferencia de tirante (24 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	3
12:30	3	2.9
13:00	3	2.9
13:30	2.9	2.8
14:00	2.9	2.8
14:30	2.8	2.7
15:00	2.8	2.7
15:30	2.7	2.6
16:00	2.7	2.6
16:30	2.7	2.5
17:00	2.6	2.5

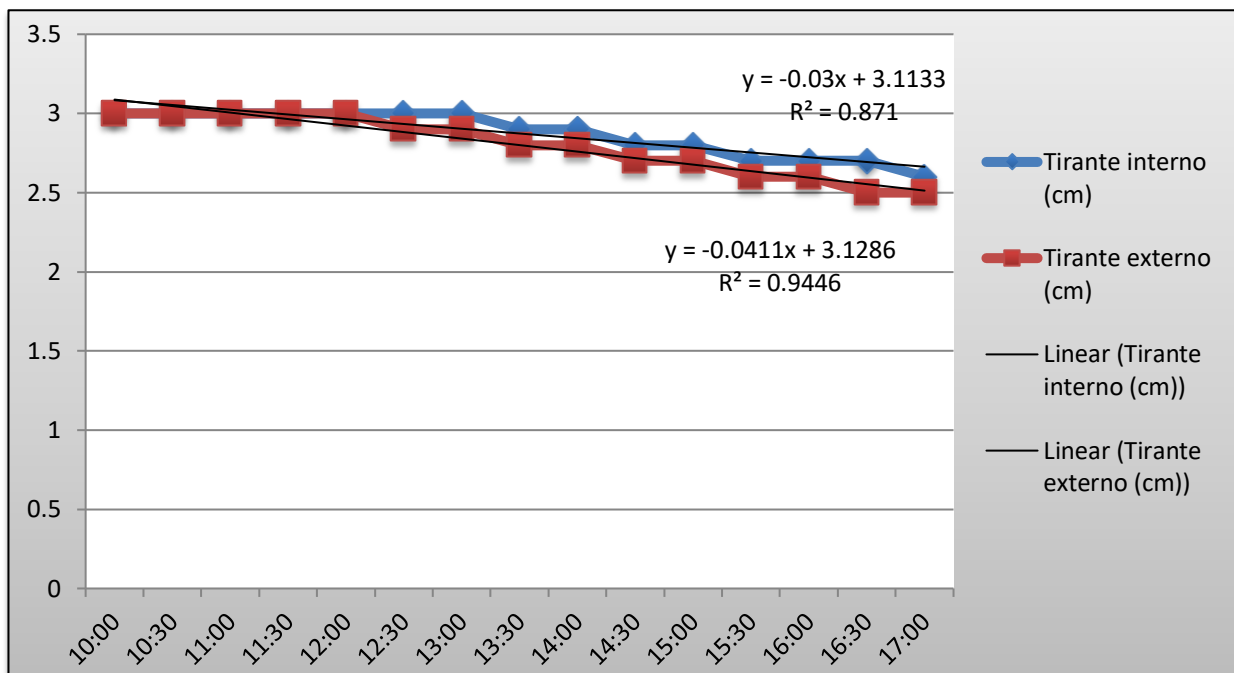


Figura A4.34 Diferencia de tirante (24 Mayo 2017)

Tabla A4.35 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (24 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	29.246	43.07	24.605	52.345
10:30	36.534	26.817	29.165	37.805
11:00	34.501	26.651	28.245	39.973
11:30	51.539	19.72	36.227	24.591
12:00	54.77	19.483	39.857	20.117
12:30	51.186	26.807	38.309	22.031
13:00	60.455	15	42.833	17.052
13:30	61.379	15	40.286	20.069
14:00	59.298	22.563	37.838	21.145
14:30	52.652	33.295	35.797	23.008
15:00	49.765	36.847	33.417	24.47
15:30	49.222	31.077	33.001	24.441
16:00	40.096	43.047	31.408	26.489
16:30	33.113	55.543	28.692	34.335
17:00	29.346	57.643	23.713	49.691

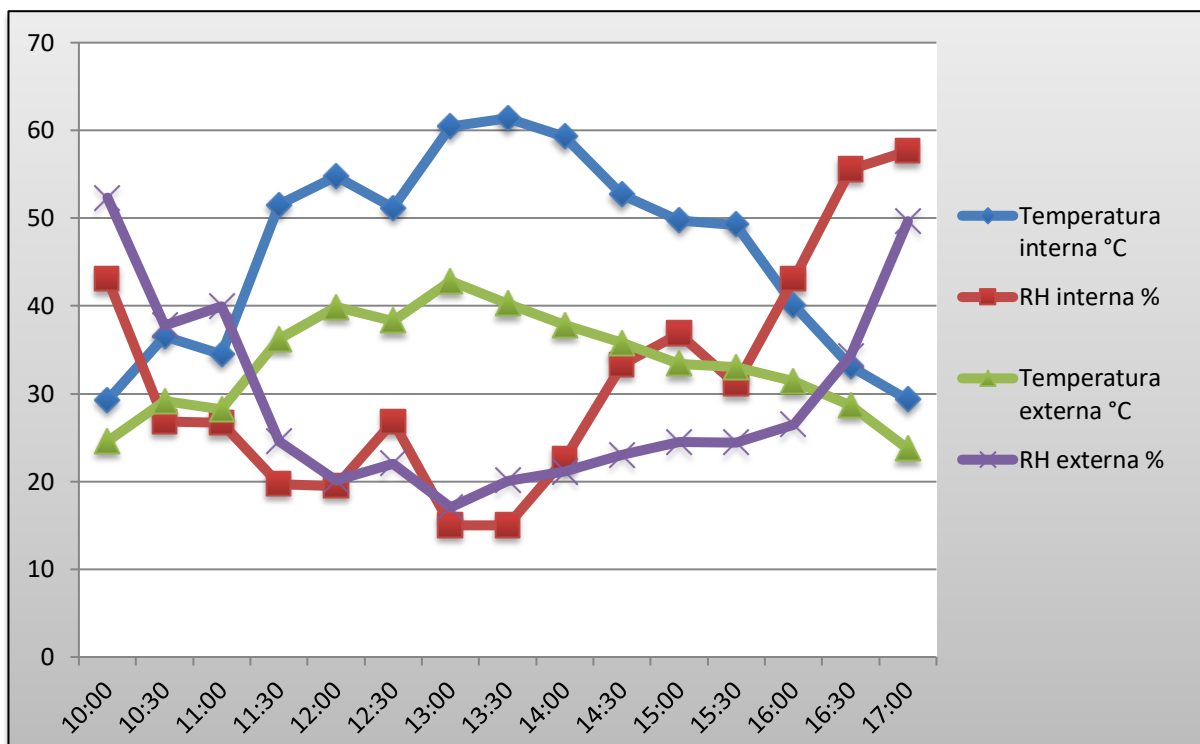
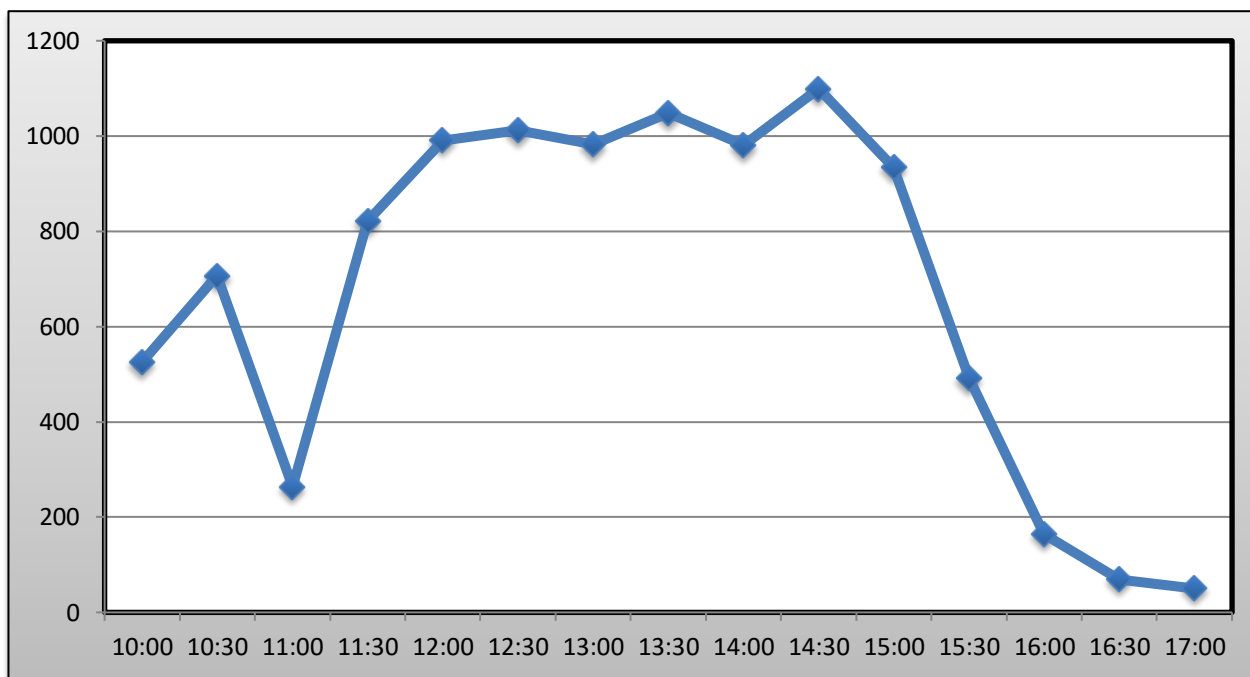


Figura A4.35 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (24 Mayo 2017)

Tabla A4.36 Radiación Solar (24 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	525.6
10:30	706.9
11:00	263.1
11:30	821.9
12:00	990.6
12:30	1,011.90
13:00	981.9
13:30	1,048.10
14:00	980.6
14:30	1,099.40
15:00	934.4
15:30	491.9
16:00	164.4
16:30	69.4
17:00	50.1





**Figura A4.36 Radiación Solar (24 Mayo 2017)**

Los datos presentados en las tablas A4.37, A4.38 y A4.39 corresponden a la experimentación realizada el día 25 de mayo de 2017.

**Tabla A4.37 Diferencia de tirante (25 Mayo 2017)**

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	3
12:00	3	2.9
12:30	3	2.9
13:00	3	2.9
13:30	3	2.8
14:00	2.9	2.8
14:30	2.9	2.7
15:00	2.9	2.7
15:30	2.8	2.6
16:00	2.8	2.6
16:30	2.8	2.6
17:00	2.7	2.6

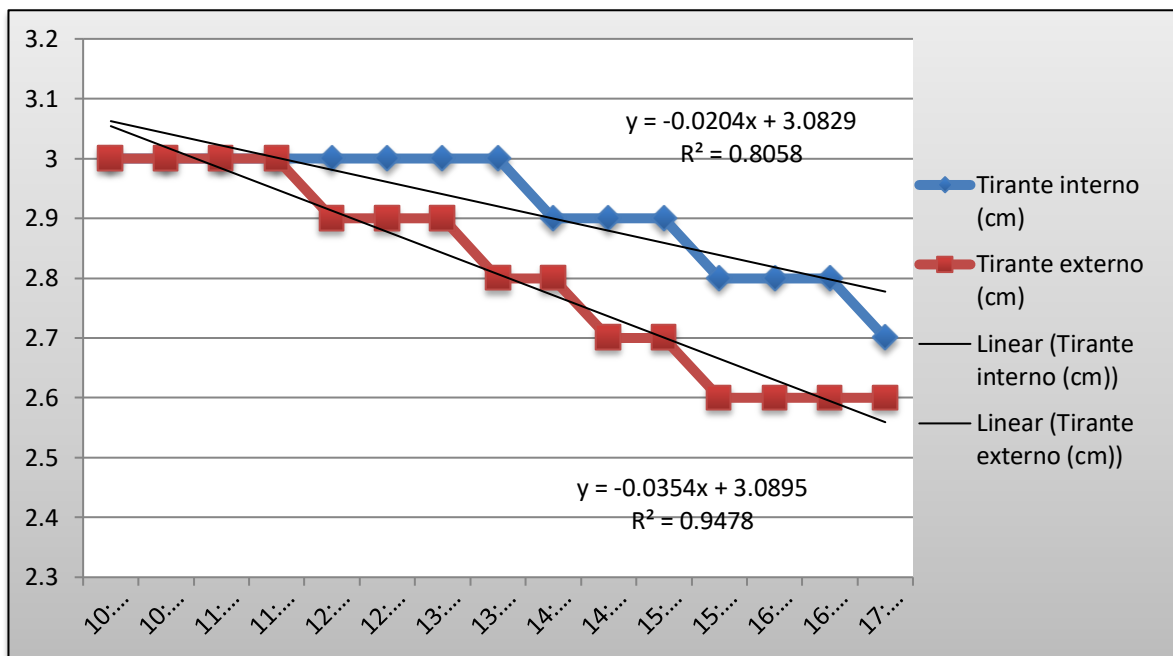


Figura A4.37 Diferencia de tirante (25 Mayo 2017)

Tabla A4.38 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (25 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	24.682	47.911	24.296	48.727
10:30	35.913	72.462	30.577	33.954
11:00	40.613	66.142	33.113	28.692
11:30	43.689	61.979	34.422	23.362
12:00	46.976	58.803	39.103	16.016
12:30	43.659	61.984	34.264	22.097
13:00	51.221	51.869	44.98	15
13:30	53.829	45.7	36.48	15
14:00	54.504	46.499	37.986	15
14:30	53.053	47.45	35.967	15
15:00	53.053	26.109	35.004	15
15:30	56.162	32.672	34.607	15
16:00	53.016	39.516	32.492	17.927
16:30	40.989	54.992	30.805	22.919
17:00	36.643	63.033	28.4	28.569

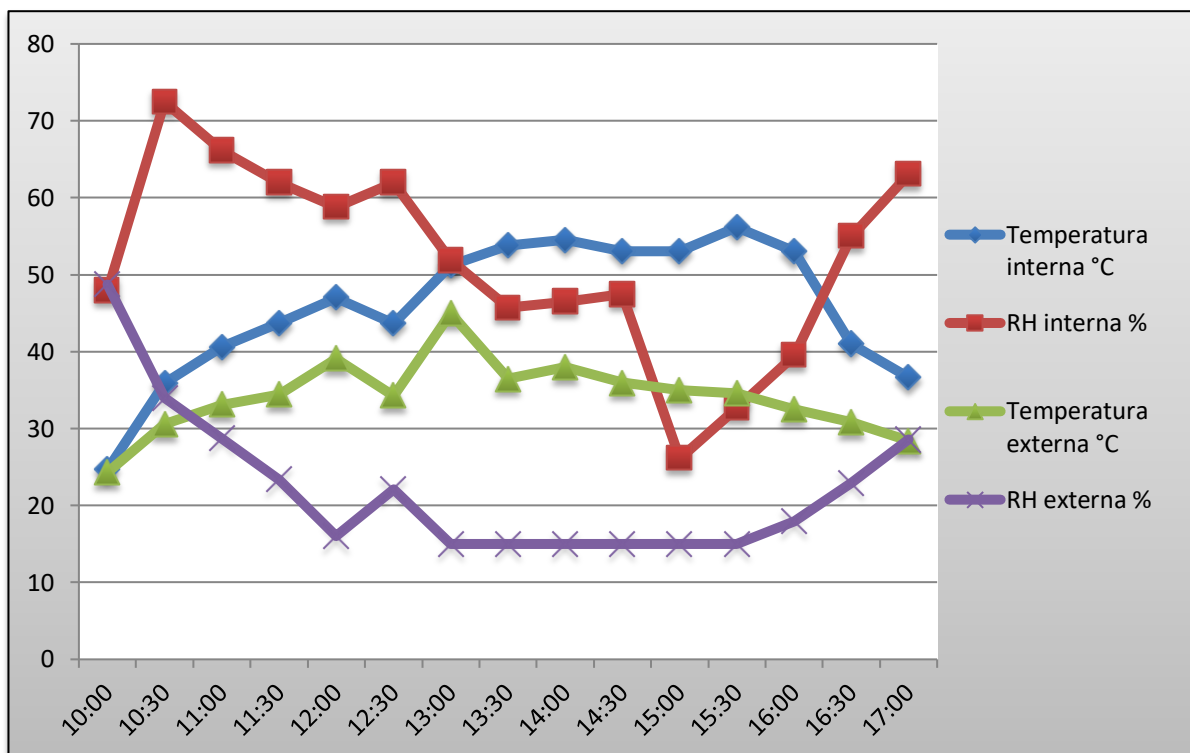


Figura A4.38 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (25 Mayo 2017)

Tabla A4.39 Radiación Solar (25 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	123.4
10:30	620.6
11:00	593.1
11:30	566.9
12:00	719.4
12:30	355.6
13:00	951.9
13:30	958.1
14:00	983.1
14:30	906.9
15:00	874.4
15:30	760.6
16:00	448.1
16:30	246.9
17:00	178.1

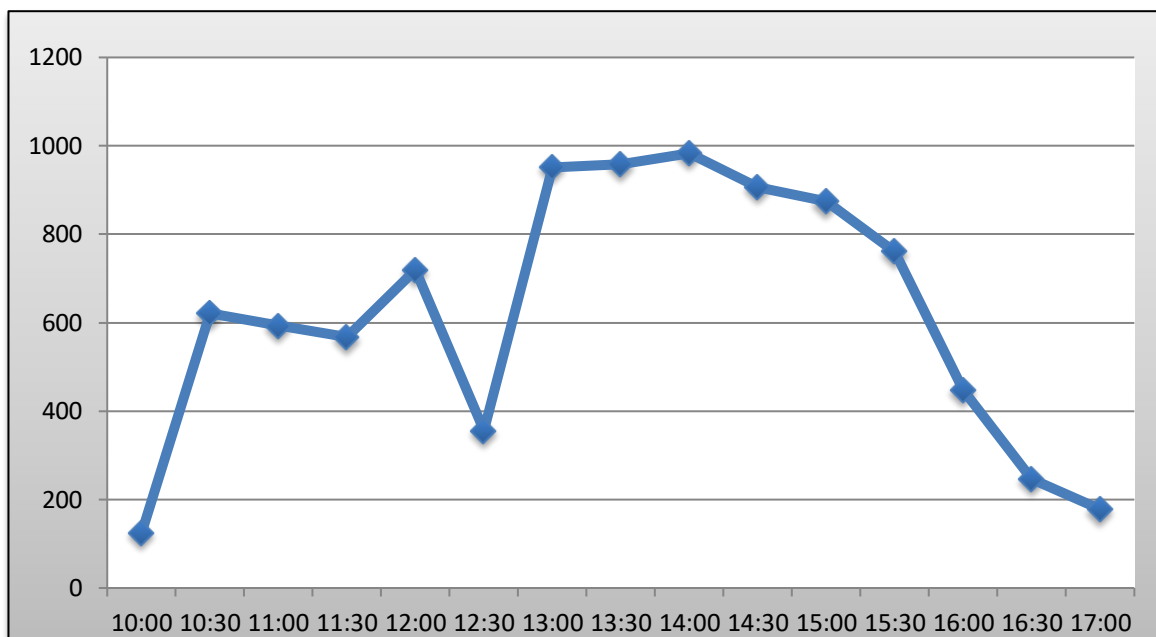


Figura A4.39 Radiación Solar (25 Mayo 2017)

Los datos presentados en las tablas A4.40, A4.41 y A4.42 corresponden a la experimentación realizada el día 26 de mayo de 2017.

Tabla A4.40 Diferencia de tirante (26 Mayo 2017)

Hora	Tirante interno (cm)	Tirante externo (cm)
10:00	3	3
10:30	3	3
11:00	3	3
11:30	3	2.9
12:00	3	2.9
12:30	3	2.8
13:00	3	2.8
13:30	2.9	2.7
14:00	2.9	2.7
14:30	2.9	2.6
15:00	2.8	2.6
15:30	2.8	2.5
16:00	2.8	2.5
16:30	2.7	2.4
17:00	2.7	2.4

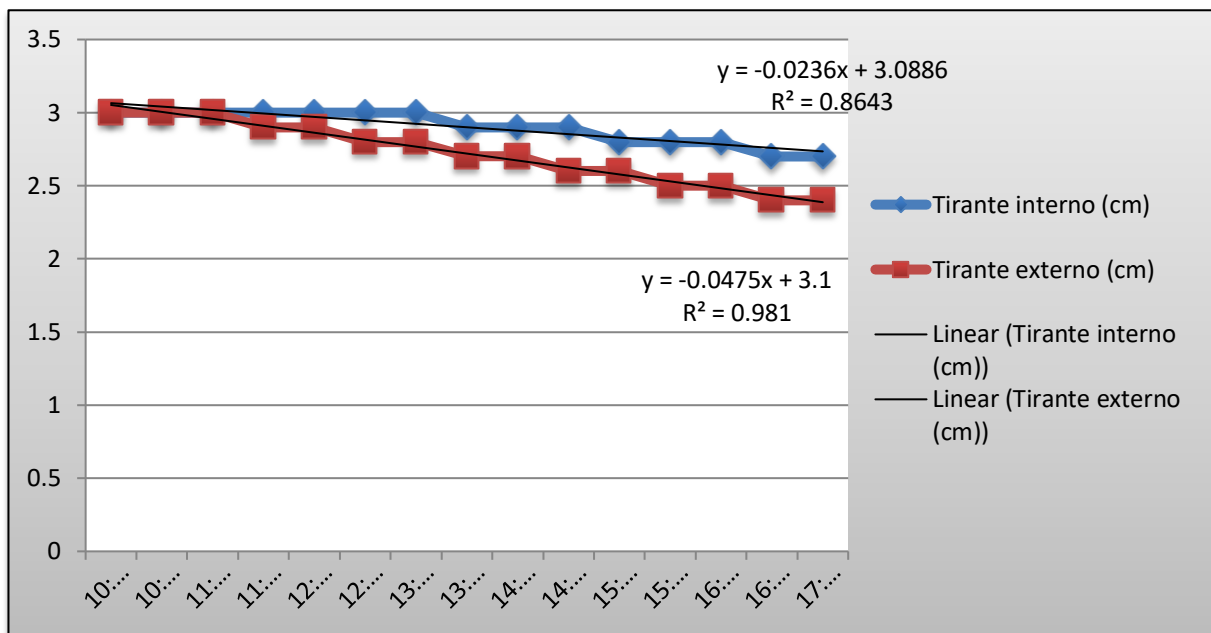


Figura A4.40 Diferencia de tirante (26 Mayo 2017)

Tabla A4.41 Diferencia de Temperatura y Humedad Relativa (26 Mayo 2017)

Hora	Temperatura interna °C	RH interna %	Temperatura externa °C	RH externa %
10:00	23.717	42.992	23.549	40.564
10:30	41.924	56.437	36.724	20.111
11:00	48.617	49.808	39.527	15
11:30	49.595	52.431	42.546	15
12:00	49.595	56.063	44.331	15
12:30	50.108	53.446	43.356	15
13:00	54.846	47.061	47.333	15
13:30	55.966	44.638	50.801	15
14:00	57.155	45.083	50.488	15
14:30	53.68	50.993	47.235	15
15:00	56.398	43.705	48.086	15
15:30	58.172	27.053	45.136	15
16:00	58.794	29.833	45.953	15
16:30	56.437	32.557	43.386	15
17:00	50.418	34.649	41.484	15

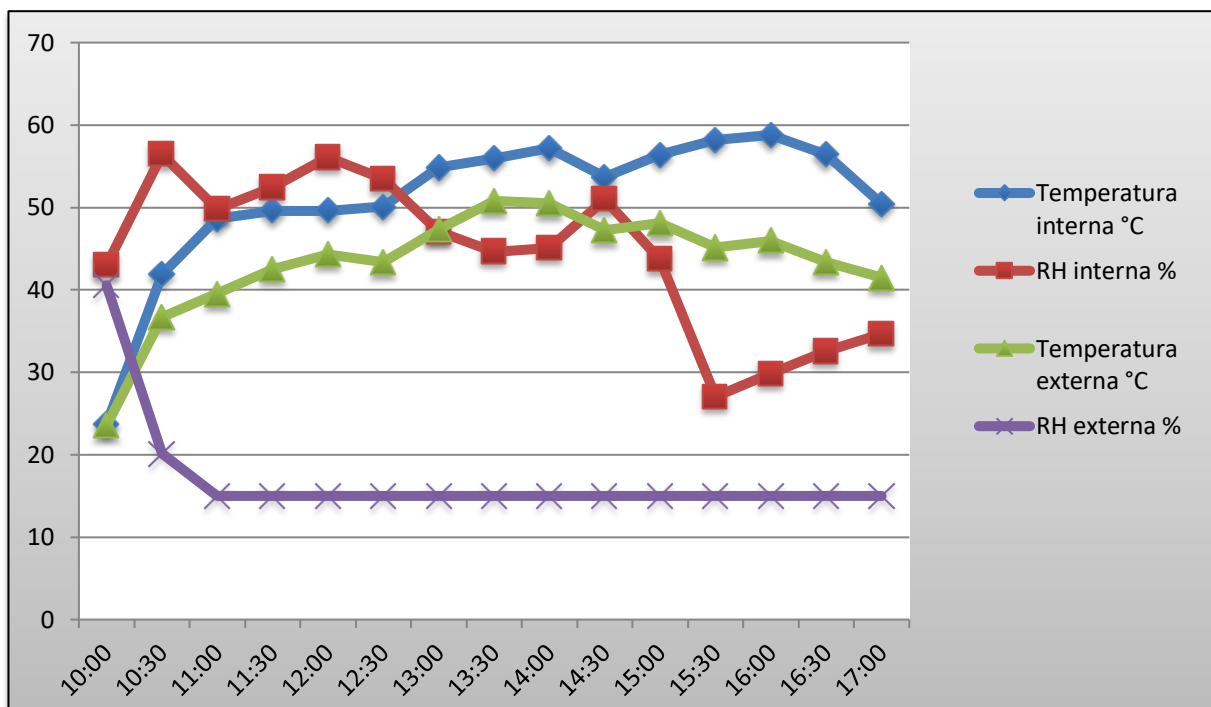


Figura A4.41 Diferencia de temperature y Humedad Relativa (26 Mayo 2017)

Tabla A4.42 Radiación Solar (26 Mayo 2017)

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
10:00	585.6
10:30	714.4
11:00	776.9
11:30	855.6
12:00	925.6
12:30	975.6
13:00	1,019.40
13:30	1,090.60
14:00	1,191.90
14:30	958.1
15:00	1,025.60
15:30	919.4
16:00	814.4
16:30	741.9
17:00	724.4

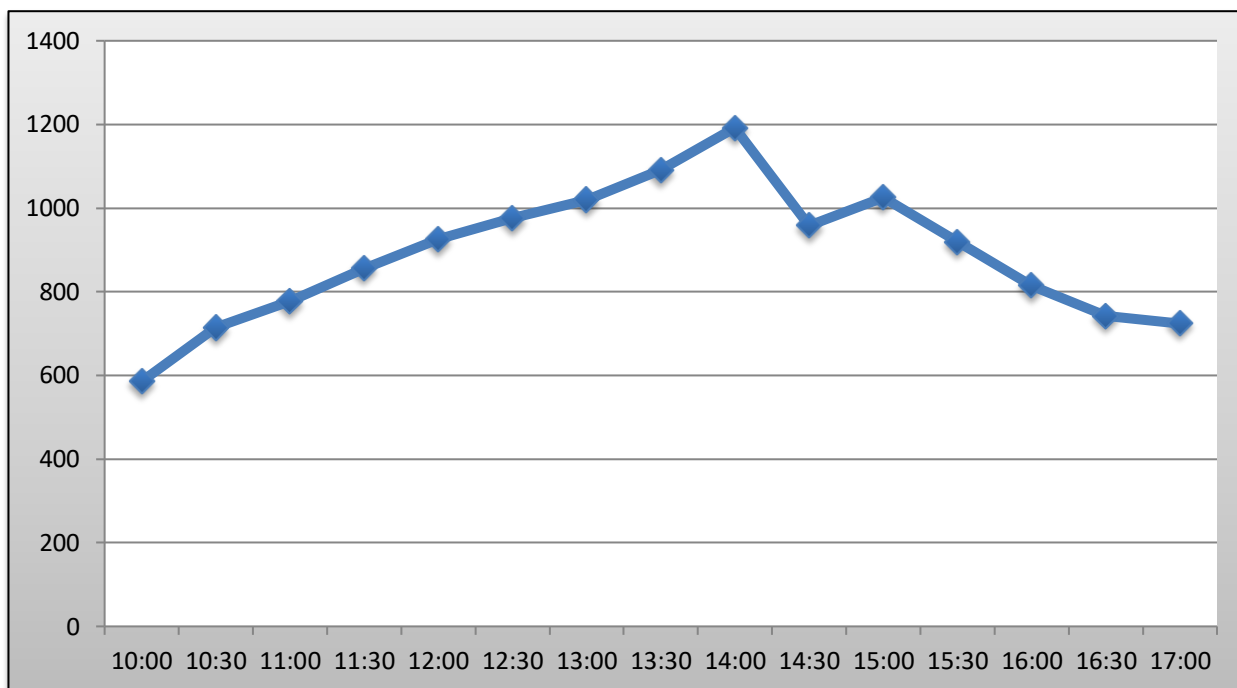


Figura A4.42 Radiación Solar (26 Mayo 2017)

## 9.5. Anexo 5. Cálculos

### 9.5.1. Colector solar plano

La ecuación A5.1 se necesita para determinar el área del colector solar plano;

$$A = \frac{q}{\eta * G} \quad (\text{Ec. A 5.1})$$

Donde;

q= calor específico de una sustancia (KJ)

$\eta$  = eficiencia del colector solar

G= Irradiancia solar (W/ m<sup>2</sup>)

La tabla A5.1 muestra los datos básicos para calcular el Área, es necesario conocer el valor del calor específico de la sustancia a destilar en este caso será agua salada.

$$q = m * C_{p_{\text{agua salada}}} * \Delta T \quad (\text{Ec A5.2})$$

**Tabla A5.1 Parámetros para determinar el calor específico del agua salada.**

Parámetro		
Temperatura inicial (To)	12 ° C	285 K
Temperatura final (Tf)	30 ° C	303 K
$\Delta T = T_f - T_o$	-----	18 °K
Cp del agua salada	4 KJ/(Kg°C)	
Volumen de agua a destilar	60 litros	
Eficiencia ( $\eta$ )	0.5	

Para determinar la Irradiancia solar se tomaron datos históricos mensuales y por hora, para los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero, fijándose un periodo de 5 hrs que abarca de las 10.00 am hasta las 15.00 hrs ya que en este tiempo es cuando se presenta una mayor radiación solar (Duffie, 2013). Estos datos se presentan en la tabla A5.2

**Tabla A5.2 Irradiancia mensual mes Noviembre de 2013.**

Noviembre		
Promedio mensual	Tiempo desde 10am (s)	Irradiancia media mensual por hora (W/m <sup>2</sup> )
10:00	0	483.68
10:30	1800	547.63
11:00	3600	561.1
11:30	5400	590.84
12:00	7200	620.36
12:30	9000	606.47
13:00	10800	516.78
13:30	12600	489.52
14:00	14400	396.84
14:30	16200	285.26
15:00	18000	234

Una vez que se obtienen los promedios mensuales se calcula el área bajo la curva la cual determina la Irradiancia total por mes.



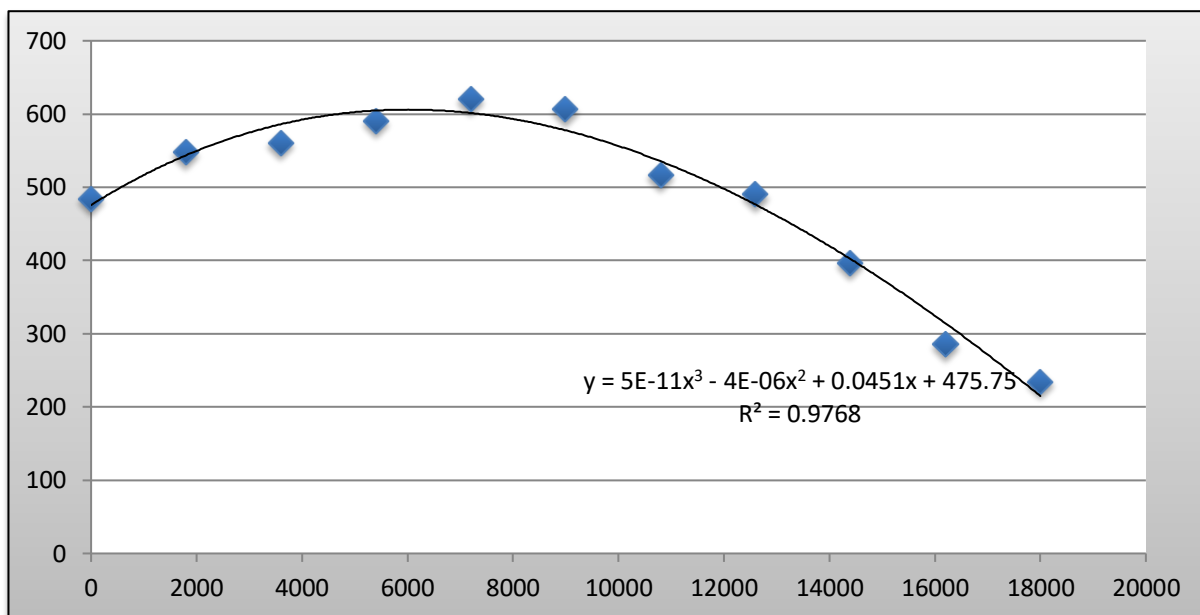


Figura A5.1 Irradiancia Solar (Noviembre 2013)

Con los datos de la Red Pembu, estación Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA), se determinaron los valores para la Irradiancia como se mostró en la gráfica A5.1 para los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero. Ya que es conocido el valor de la Irradiancia mensual (G) se sustituye en la ecuación A5.2 y se obtiene los resultados para el área presentándose en la tabla A5.3.

Tabla A5.3 Coeficiente de Irradiancia mensual.

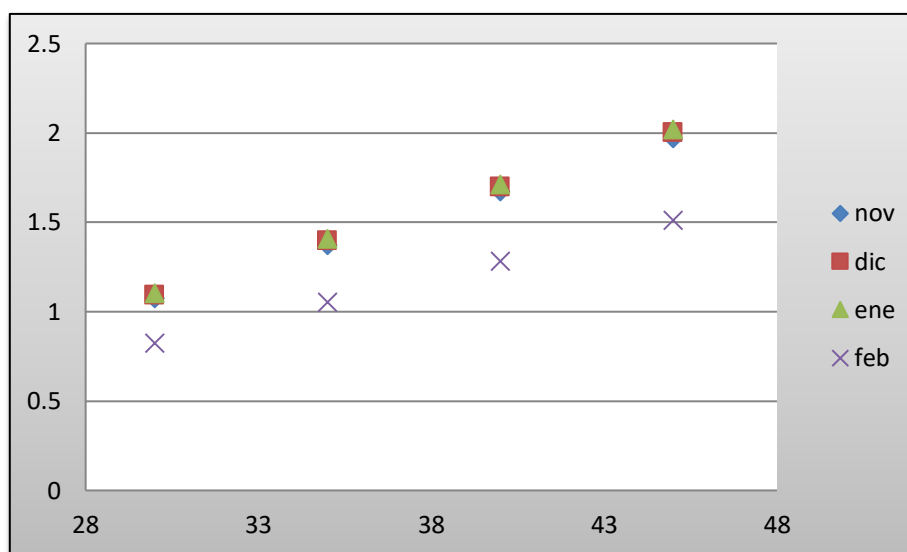
Mes	Irradiancia mensual G (W/m <sup>2</sup> )	Área colector solar m <sup>2</sup> $A = \frac{q}{\eta * G}$
Noviembre	9389.7	0.920157194
Diciembre	9240.98	0.934965772
Enero	9162.18	0.943007014
Febrero	12231.9	0.70634979

La tabla A5.4 muestra los valores obtenidos del Área del colector a diferentes temperaturas de salida (30 °C, 35 °C, 40 °C y 45 °C):

**Tabla A5.4 Evaluación del área y la temperatura final.**

Tsalida	Área (m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )
30	0.920157194	0.934965772	0.943007014	0.70634979
35	1.175756414	1.194678486	1.204953406	0.902558065
40	1.431355634	1.454391201	1.466899799	1.09876634
45	1.686954855	1.714103915	1.728846192	1.294974616

Estos datos se grafican como se muestra en la figura A5.2, se selecciona el área en función de los meses que se va a experimentar y la temperatura final a la que se desea llegar que es de 30°C.



**Figura A5.2 Área del colector vs Temperatura Final.**

Una vez que se tiene esta información el área que se adapta a las necesidades del proyecto es de 1 x 1 m<sup>2</sup>.

### 9.5.2. Sistema de flujo continuo de agua

Para el sistema de flujo continuo se propuso un volumen de agua de 60 litros ya que este es el volumen máximo admisible para las cuatro canaletas que se encuentran dentro de la caseta (15 litros por canaleta).

Se calcula el gasto partiendo de la ecuación A5.3, donde  $V$  corresponde al Volumen neto de 60 litros;  $t$  representa el tiempo medido en segundos, para este ejemplo se considera  $t=10$  segundos.

$$Q = \frac{0.06 \text{ m}^3}{10\text{s}} = 0.006 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (Ec. A5.3)}$$

Una vez que se obtiene el valor del gasto se determina la velocidad del flujo en la instalación, con la ecuación A5.4.

$$Q = \frac{V}{A} \text{ (Ec. A5.4)}$$

Despejando V, de la ecuación A5.4 se tiene que:

$$V = \frac{Q}{A} \text{ (Ec. A5.5)}$$

Donde:

Q = corresponde al gasto

A= Área del tubo

Sustituyendo en la ecuación A5.5 utilizando un diámetro de ¼" para manguera se obtiene la siguiente velocidad:

$$\frac{1}{4}'' = 0.00635\text{m}$$

$$\text{Área } \frac{1}{4}'' = \frac{\pi D^2}{4} = 0.0000316 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.006\text{m}^3}{0.0000316\text{m}^2} = 189.8 \text{ m/s} \text{ (Ec. A5.5)}$$

Esta velocidad sobrepasa lo permisible en tuberías por lo tanto se ajusta el tiempo a 20 minutos, repitiendo los pasos anteriores, primero sustituyendo en la ecuación A5.5 se obtiene un gasto y una velocidad de:

$$Q = \frac{0.06 \text{ m}^3}{1200\text{s}} = 0.00005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.00005 \text{ m}^3}{0.0000316 \text{ m}^2} = 1.582\text{m/s}$$

Este valor de 1.582 m/s satisface el rango permisible de 1 a 2.5 m/s en tuberías. Por lo tanto, este valor es el que se toma (Mott, 1996).

La instalación se divide en cuatro secciones que se analizan de acuerdo a la ecuación de energía (Ec. A5.6) en cada una de las secciones antes mencionadas:

**Ecuación de la energía entre las secciones 0 a 1.**

$$H_0 = H_1 + \sum_0^1 h_f + \sum_0^1 h_l \quad (\text{Ec. A5.6})$$

Donde:

$H_0$ : Energía del agua en la sección "0"

$$\sum_0^1 h_f : \text{pérdidas por fricción de 0 a 1}$$

$$\sum_0^1 h_l : \text{pérdidas por accesorios de 0 a 1}$$

Considerando el piso del techo de la azotea del edificio anexo de la Facultad de Ingeniería como el plano horizontal de referencia se tiene que:

$$Z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum_0^A h_f + \sum_A^B h_f + \sum_B^1 h_f + \sum_0^A h_l + \sum_A^B h_l + \sum_B^1 h_l$$

Como de la sección 0 - A y B - 1 el material de la instalación es hule, entonces las pérdidas por fricción se consideran despreciables por lo tanto la ecuación se reduce a:

$$Z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum_A^B h_f + \sum_0^A h_l + \sum_A^B h_l$$

De acuerdo con la figura A5.3 se tiene que:

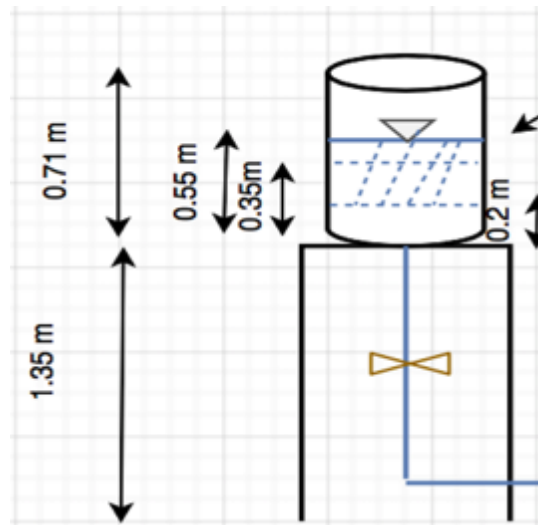


Figura A5.3 Análisis de energía en la salida del tanque (Elaboración propia, 2017).

$Z_0$ : 1.58 m

$P_0$  y  $P_1$ : son cero

$V_1$ : es cero debido a que no hay velocidad en ese punto.

Por lo tanto, la ecuación de continuidad queda expresada de la siguiente forma:

$$1.58 + 0 + 0 = 1.3 + 0 + \frac{V_1^2}{2g} + f_{A-B} \frac{L_{AB}}{D_{A-B}} \frac{V_{A-B}^2}{2g} + k_{entrada} \frac{V_{0-B}^2}{2g} + 5k_{reducción} \frac{V_{A-B}^2}{2g} + k_{salida} \frac{V_{B-1}^2}{2g}$$

Para fines prácticos la velocidad  $V_{A-B}$  se considerara igual a la velocidad de  $V_1 = V_{0-A}$ , por lo tanto  $V_1 = V_{0-A} = V_{A-B} = V_{flujo}$

$$1.58 - 1.3 = V_{flujo}^2 \left( \frac{1}{2g} + f_{A-B} \frac{L_{AB}}{D_{A-B}} \frac{1}{2g} + k_{entrada} \frac{1}{2g} + 5k_{reducción} \frac{1}{2g} + k_{salida} \frac{1}{2g} \right)$$

Con el Diagrama de Moody (Mott, 1996) se obtiene el valor del factor fricción  $f$  para flujo turbulento de la sección A – B. Si se considera que la tubería es de cobre  $\varepsilon = 0.0015\text{mm}$ ,  $\Phi_{A-B} = 12.7\text{mm}$  el valor de la rugosidad relativa es igual a  $\frac{\varepsilon}{\Phi_{A-B}} = 1.18 \times 10^{-4}$  por lo tanto el factor  $f$  es de  $f = 0.0135$ .

Con este dato se sustituye en la ecuación despejando  $V_{flujo}^2$

$$V_{flujo}^2 = \frac{1.58 - 1.3}{\frac{1}{2g} + f_{A-B} \frac{L_{AB}}{D_{A-B}} \frac{1}{2g} + k_{entrada} \frac{1}{2g} + 5 k_{reducción} \frac{1}{2g} + k_{salida} \frac{1}{2g}}$$

Sustituyendo valores:

$$V_{flujo}^2 = \frac{0.28 \text{ m}}{0.050 + 0.0135 \times \left( \frac{1.2 \times 5}{0.0127} \right) (0.050) + 0.5(0.050) + 5(0.26)(0.050) + (0.05)}$$

$$V_{flujo}^2 = \frac{0.28 \text{ m}}{0.508} = \sqrt{0.551} = 0.74 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sustituyendo:

$$Q = V A = \left( \frac{0.74 \text{ m}}{\text{s}} \right) (0.0000316 \text{ m}^2) = 0.0000233 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = \frac{V}{t} = t = \frac{V}{Q} = \frac{0.06 \text{ m}^3}{0.0000233 \text{ m}^3/\text{s}} = 2575.10 \text{ seg} = 42 \text{ min}$$

### 9.5.3. Cálculo Sistema de Extracción

Para calcular el extractor ideal para la caseta de destilación solar primero se calcula el volumen de la caseta la cual se compone de:

$$V = \text{paralelepipedo} + \text{prisma (Ec. A5.7)}$$

$$V = \text{base} + \text{Techo}$$

$$V = V_B + V_T$$

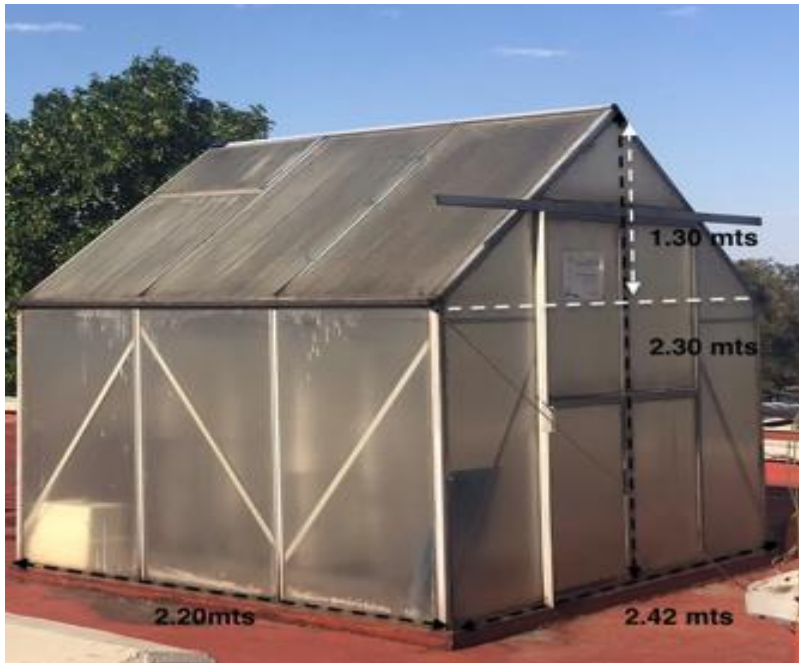


Figura A5.4 Dimensiones caseta

Con base en las medidas presentadas se calcula el volumen de la base:

$$VB = 2.42 \text{ m} \times 2.20 \text{ m} \times 2.30 \text{ m} = 12.24 \text{ m}^3$$

Mediante el uso de la ecuación 5.8 se calcula el volumen del techo:

$$B = b \times h \text{ (Ec. A5.8)}$$

La ecuación A5.9 se utiliza para calcular el área del triángulo del techo:

$$B = \frac{bh}{2} \text{ (Ec. A5.9)}$$

$$B = \frac{2.42 \text{ m} \times 1.30 \text{ m}}{2} = 1.57 \text{ m}^2$$

$$VT = 1.57 \text{ m}^2 \times 2.20 \text{ m} = 3.45 \text{ m}^3$$

Una vez calculados ambos volúmenes (VT y VB), se sustituyen en la ecuación A5.7 y se suman, el resultado de la suma representa el volumen total de la caseta:

$$V = 3.45 \text{ m}^3 + 12.24 \text{ m}^3 = 15.69 \text{ m}^3$$

Para obtener el número de renovaciones se consultó un manual para ventilación de invernaderos el cual sugiere 10 ciclos (Escoda, 2011). Este número se multiplica por el volumen total de la caseta, dando como resultado el Gasto en m<sup>3</sup>/h.

$$Gasto = Vol. caseta \times n \text{ (número de ciclos)} \text{ (Ec. A5.10)}$$

$$G = 156.9 m^3 / h$$

El gasto resultante se divide entre 3,600 segundos.

$$G = \frac{156.9 m^3 / h}{3600s} = .043 \frac{m^3}{s}$$

$$fv = .043 \frac{m^3}{s}$$

Utilizando un termómetro se miden la temperatura ambiente y la temperatura dentro de la caseta, así como su humedad relativa.

**Tabla A5.5 Condiciones caseta y medio ambiente (24 Abril 2017).**

CONCEPTO	Caseta	Medio ambiente
Temperatura °C	44°C	32 °C
Humedad relativa %	35 %	15%
Temperatura °K	317 K	305K
Entalpia <sup>5</sup>	93 KJ/Kg	45 KJ/Kg

$$ma h1 = Q + mah2 + mcond hf \text{ (Ec. A5.11)}$$

Donde;

Q= Calor producido

h1= Entalpia temperatura 1

h2 = Entalpia temperatura 2

Se calcula *ma* como sigue:

$$ma = (fv) \times \frac{Patm}{Raire T1} \text{ (Ec. A5.12)}$$

<sup>5</sup> La entalpia se obtuvo en valores mostrados en la carta psicrométrica (Escoda, 2011).



$$ma = 0.043 \frac{m^3}{s} \times \frac{78 \text{ kPa}}{0.287 \frac{\text{kPa m}^3}{\text{kg K}} \times 317 \text{ K}} = .036 \frac{\text{kg}}{s}$$

Para obtener mconducto se utiliza de la tabla psicrométrica (Escoda, 2011) la humedad total (w).

$$mcond = ma (w_1 - w_2) \text{ (Ec. A5.13)}$$

w1 = .02 kg de vapor / kg de aire seco

w2= .003 kg de vapor / kg de aire seco

$$mcond = .036 \text{ kg/s} (0.02 - .003) = 0.000612 \text{ kg/s}$$

Despejando Q:

$$Q = ma (h_1 - h_2) - m_{cond} {}^6hf \text{ (Ec. A5.14)}$$

$$Q = \left( .036 \frac{\text{kg}}{s} \right) \times \left( \frac{93 \text{ kJ}}{\text{kg}} - \frac{45 \text{ kJ}}{\text{kg}} \right) - \left( 0.000612 \frac{\text{kg}}{s} \right) \times 134.15 \text{ kJ/kg} = 1.646 \text{ KW}$$

1.646 KW se convierte en 1646 W

Finalmente, para obtener el área:

$$Q = UA \Delta T_{ln} \text{ (Ec. A5.15)}$$

Despejando A, se tiene:

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{ln}}$$

$$A = \frac{1.646 \text{ KW}}{30 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} (\Delta T_{ln})}$$

La ecuación A5.16 se utiliza para obtener  $\Delta T_{ln}$ , de la siguiente forma:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1 - T_{agua}) - (T_2 - T_{agua})}{\ln \left( \frac{T_1 - T_{agua}}{T_2 - T_{agua}} \right)} \text{ (Ec. A5.16)}$$

<sup>6</sup> hf = 134.15 KJ / kg de la tabla para agua saturada se tomó un valor para la temperatura del medio ambiente de 32 °C

$$\Delta T_{ln} = \frac{(32^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C}) - (44^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C})}{\ln\left(\frac{32^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C}}{44 - 19^{\circ}\text{C}}\right)}$$

$$\Delta T_{ln} = 18.35^{\circ}\text{C}$$

En la ecuación A5.15 se sustituye el valor del  $\Delta T_{ln}$ :

$$A = \frac{1,646 \text{ W}}{\left(\frac{30\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}}\right) (18.35^{\circ}\text{C})} = 2.99 \text{ m}^2$$

Este resultado determina el área total de la serpentina. Finalmente, se escoge manguera lisa transparente como el mejor material, ya que es fácil de conseguir y su costo no es muy elevado.