

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias

Escuela Académico Profesional de Física Aplicada

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN
DESTILADOR SOLAR TUBULAR PARA DESALINIZAR AGUA
DE MAR”**

TESIS

Presentada por:

BACH. EFRACIO MAMANI FLORES

Para Optar el Título Profesional de:

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

TACNA – PERU

2012

Dedicatoria:

“A ti Dios Mío, por no abandonarme, por estar cerca de uno de tus hijos preferidos... Gracias por ayudarme a levantarme en mis fracasos, por aprender de ellos y principalmente, por permitirme realizar el sueño más importante de mi vida”.

Agradecimientos

En especial al Lic. Carlos Armando Polo Bravo, mi asesor. Por su apoyo incondicional en este proyecto de investigación.

Al profesor MsC. Hugo Torres Muro y A todos mis profesores, agradezco sus enseñanzas, por el logro de uno de mis grandes anhelos.

CONTENIDO

	Página
Índice de figuras.....	IV
Nomenclatura.....	VIII
Resumen.....	XI
Introducción.....	01
Introducción.....	02
 CAPÍTULO I: PLANEAMIENTO DEL ESTUDIO	
1.1.- Planteamiento del problema.....	03
1.2.- Formulación del problema.....	04
1.3.- Justificación de la investigación.....	04
1.4.- Objetivos.....	05
1.5.- Hipótesis.....	06
1.6.- Variables de estudio.....	06
 CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	
2.1.Introducción.....	07
2.2.Métodos de destilación.....	08
2.2.1.Destilación por múltiple efecto (MED).....	10
2.2.2.Compresión térmica de vapor (TVC).....	12
2.2.3.Destilación solar.....	13
2.2.4.Destilación por membranas.....	15
2.2.5.Compresión mecánica de vapor (CV).....	15
2.2.6.Ósmosis inversa.....	17
2.2.7.Resumen.....	22
2.3.Proceso de transferencia de calor.....	23
2.3.1.Conducción.....	23
2.3.2.Convección.....	25
2.3.3.Radiación.....	27
2.4.Potencial de hidrógeno (pH).....	29

2.5.Orientación e inclinación del DST.....	34
2.5.1.Orientación del DST.....	34
2.5.2.Inclinación del DST.....	34
2.6.El Principio de Funcionamiento de Destilador Solar.....	35
2.6.1.Transferencia de calor para el DST.....	36
2.6.2.Caracterización de transferencia de calor para agua de mar en el interior del DST	37
2.6.3.Caracterización de transferencia de calor para canaleta negra en el interior del DST	39
2.6.4.Caracterización de transferencia de calor para aire húmedo en el interior del DST	41
2.6.5.Caracterización de transferencia de calor para la cubierta tubular transparente (vidrio).....	43
2.6.6. Solución aproximada para estado estacionario, aplicada al DST.....	45

CAPÍTULO III: MATERIALES, INSTRUMENTOS Y MÉTODOS

3.1.- Materiales.....	50
3.2.- Instrumentos.....	50
3.3.- Metodología.....	51
3.3.1.- Diseño experimental del DST.....	51
3.3.2.- Construcción de destilador solar tubular.....	52
3.3.3.- Caracterización experimental del DST.....	55
3.3.4.- Costo de construcción de DST.....	61

CAPÍTULO IV: DATOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.- Gráficos para el primer día de la evaluación del DST.....	63
4.2.- Gráficos de evaluación para día totalmente soleado del DST.....	67
4.3.- Gráficos de evaluación para día con nubosidad parcial.....	70
4.4.- Gráficos de evaluación para día con nubosidad total del DST.....	73

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.....	83
Recomendaciones.....	84
Referencias bibliográficas.....	85
Anexos.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.2.1:	Esquema de una planta de evaporación súbita por efecto flash.....	09
Figura. 2.2	: Destilación múltiple efecto (MED) con evaporador es horizontales (HFF).....	10
Figura. 2.3	: Esquema típico del termocompresor acoplado a una planta (TVC).....	12
Figura. 2.4	: Esquema de un colector solar para destilación ...	13
Figura. 2.5	: Diagrama de la compresión de vapor (CV) con evaporador de tubos verticales	16
Figura. 2.6	: Proceso natural de ósmosis.....	18
Figura. 2.7	: Proceso de ósmosis inversa	19
Figura. 2.8	: Desalación por ósmosis inversa (OI) con turbina pelton incorporada	20
Figura. 2.9	: Proceso de transferencia de calor por conducción.....	24
Figura. 2.10	: Aislante	25
Figura. 2.11	: Transferencia de calor por convección.....	26
Figura. 2.12	: Reacción química de distribución del pH	29
Figura. 2.13	: Esquema de redistribución de pH.....	30
Figura. 2.14	: La figura muestra la forma de medir el pH.....	32
Figura. 2.15	: Esquema de la redistribución de pH	33
Figura. 2.16	: Aparato de medición de pH.....	33
Figura. 2.17	: Orientación del DST.....	34
Figura. 2.18	: El ángulo de Inclinación del DST es dos grados con respecto al plano horizontal.....	34
Figura. 2.19	: Esquema general de la transferencia de calor del DST.....	35
Figura. 2.20	: Descripción general de transferencia de calor del DST.....	36

Figura. 2.21	:	Las transferencias de calor que se dan en el agua de mar estando en estado de reposo.....	38
Figura. 2.22	:	Las transferencias de calor de la canaleta negra de aluminio.....	40
Figura. 2.23	:	Descripción del aire húmedo dentro DST.....	41
Figura. 2.24	:	Descripción de transferencia de calor que se dan en la cubierta tubular transparente interna (tubo de vacío).....	43
Figura. 2.25	:	Modelo observado teóricamente de las temperaturas de DST.....	48
Figura. 3.1	:	Diseño de las partes del DST.....	51
Figura. 3.2	:	El diagrama del sistema de la evaluación.....	52
Figura. 3.3	:	Proceso de construcción del DST de agua.....	53
Figura. 3.4	:	Vista general de la evaluación del DST.....	54
Figura. 3.5	:	Vista lateral de la cubierta tubular del DST.....	54
Figura. 3.6	:	Vista desde la parte superior el Destilador.....	55
Figura. 3.7	:	Medida de la radiación solar.....	55
Figura. 3.8	:	Medida de la irradiancia solar global.....	56
Figura. 3.9	:	Balanza eléctrica que se utilizó para medir La masa de agua destilada.....	57
Figura. 3.10	:	Estación HOBO.....	58
Figura. 3.11	:	Data logger (squirrel) donde se almacena los datos de temperaturas.....	58
Figura. 3.12	:	Memoria de almacenamiento de datos meteorológicos (humedad relativa en el interior del DST.....	59
Figura. 3.13	:	Aparato de. Medida de pH del agua destilada del DST.....	60
Figura. 3.14	:	Medida de la conductividad eléctrica del agua de mar que evalué en el DST.....	60

Figura. 4.1	:	Comportamiento de temperaturas en diferentes puntos del DST.....	64
Figura. 4.2	:	Gráfico de temperatura ambiente en función de las horas del día.....	64
Figura. 4.3	:	Gráfico de la humedad relativa en el interior del DST.....	65
Figura. 4.4	:	Volumen de agua destilada acumulada del DST.....	65
Figura. 4.5	:	Volumen de agua destilada en cada hora del día del DST.....	66
Figura. 4.6	:	Comportamiento de la irradiancia solar en el día de la evaluación del DST.....	67
Figura. 4.7	:	Comportamientos de las temperaturas para los días soleados del DST.....	67
Figura. 4.8	:	Volumen acumulado de agua destilada por el DST para días soleados.....	68
Figura. 4.9	:	Volumen de agua destilada por el DST en cada hora del día para días soleados.....	68
Figura. 4.10	:	Comportamiento de la irradiancia solar para días soleados en función de las horas del día.....	69
Figura. 4.11	:	Comportamiento de la humedad relativa en el interior del DST.....	69
Figura. 4.12	:	Comportamiento de la temperatura ambiente.....	70
Figura. 4.13	:	Comportamientos de las temperaturas del DST, para los días con nubosidad parcial.....	71
Figura. 4.14	:	Comportamientos de la temperatura de medio ambiente para los días con nubosidad parcial o llámese nublado.....	71
Figura. 4.15	:	Volumen acumulada de agua destilada en un día nublado.....	72

Figura. 4.16	:	Volumen de agua destilada en cada hora para un día nublado.....	72
Figura. 4.17	:	Humedad relativa dentro de DST para el día nublado.....	73
Figura. 4.18	:	Irradiancia solar global para un día con poco irradiancia solar.....	73
Figura. 4.19	:	Temperaturas de las partes del DST para el día nublado (viernes 3 de agosto).....	74
Figura. 4.20	:	Comportamiento de la irradiancia solar global para un día nublado.....	74
Figura. 4.21	:	Temperatura de ambiente para un día nublado.....	75
Figura. 4.22	:	Comportamiento de la humedad relativa dentro del DST, para un día nublado.....	75
Figura. 4.23	:	Volumen de agua destilada en cada hora del día, con mínima irradiancia solar.....	76
Figura. 4.24	:	Volumen acumulado de agua destilada para el DST durante un día nublado.....	76
Figura. 4.25	:	Aparato para medir el pH del agua destilada en el laboratorio de química analítica de la UNJBG del DST.....	78
Figura. 4.26	:	Instrumento para la medición de la conductividad eléctrica del agua destilada para el DST.....	79
Figura. 4.27	:	Variación de la salinidad del agua de mar.....	80
Figura. 4.28	:	Análisis comparativo de agua destilada para cuatro procesos de evaluación de diferentes meses del año.....	80

NOMENCLATURA

Las anotaciones y abreviaciones utilizadas durante este trabajo son las siguientes:

- A : Área.(m²).
- A_{tha} : Superficie de contacto entre la canaleta y aire húmedo (m²).
- A_{tw} : Superficie de contacto entre la canaleta y el agua de mar (m²).
- al : Albedo
- C : Calor específico de agua (J/kg °C)
- L : Calor latente de vaporización (J/kg).
- h_{cc} : Coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta tubular a la atmósfera (W/m² °C)
- h_{cdha} : Coeficiente de transferencia del calor de condensación de aire húmedo a la cubierta tubular (m/s)
- h_{cw} : Coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie de agua y aire húmedo (W/m² °C)
- h_{ew} : Coeficiente de transferencia de masa por evaporación de la superficie de agua y aire húmedo (m/s)
- h_{rc} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la cubierta tubular a la atmosfera (W/m² °C)
- h_{rw} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la superficie de agua y lacubierta tubular (W/m² °C)
- h_{tha} : Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la canaleta y el aire húmedo (W/m² °C)
- h_{tw} : Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la canaleta y el agua (W/m² °C)
- l : Longitud de la cubierta tubular (m)
- m_c : Condensación de agua destilada (kg/m²s)
- m_e : Evaporación de agua destilada (kg/m²s)
- m_p : Producción de agua destilada (kg/m² día)

Nu	:	Número de Nusselt.
Q_{cc}	:	Transferencia de calor por convección de la cubierta tubular a la atmósfera (J/s).
Q_{cdha}	:	Transferencia de calor por condensación de aire húmedo a la cubierta tubular (J/s).
Q_{cha}	:	Transferencia de calor por convección del aire húmedo a la cubierta tubular (J/s).
Q_{cw}	:	Transferencia de calor por convección de la superficie de agua al aire húmedo (J/s).
Q_{ew}	:	Transferencia de calor por evaporación de la superficie de agua al aire húmedo (J/s).
Q_{rc}	:	Transferencia de calor por radiación de la cubierta tubular a la atmósfera (J/s).
Q_{rw}	:	Transferencia de calor por radiación entre la superficie del agua y la cubierta tubular (J/s).
Q_{tha}	:	Transferencia de calor por convección entre la canaleta y aire húmedo (J/s).
Q_{tw}	:	Transferencia de calor por convección entre la canaleta y el agua de mar (J/s).
η	:	Eficiencia instantánea de producción de agua destilada del DST (%).
R_s	:	Irradiancia solar (W/m^2).
R	:	Radio de la cubierta tubular (m).
T	:	Temperatura ($^{\circ}C$).
T'	:	Temperatura (K).
V	:	Volumen (m^3).
τ	:	Coeficiente de transmisión (%).
α	:	Coeficiente de absorción (-).
DST	:	Destilador Solar Tubular.
ε	:	Emisividad(-)
ρ	:	Densidad (kg/m^3)

- σ : Constante.De Stefan-Boltzman, $5.6697 \times 10^{-8}(\text{W}/\text{m}^2\text{C}^4)$
- a : Atmosfera
- t : Canaleta
- c : cubierta tubular
- ha : Aire húmedo
- w : Agua de mar
- CIRCE* : Centro de investigación de recurso humano de Universidad de Zaragoza

RESUMEN

El Destilador Solar Tubular (DST) fue diseñado y evaluado en el Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT) de la UNJBG, Tacna, PERÚ.

El trabajo se ejecutó a una escala piloto, con el fin de investigar el comportamiento y características del destilador y del agua destilada, respectivamente, bajo condiciones de irradiancia solar global de la ciudad de Tacna.

Se empleó agua de mar para evaluar en el DST, se realizaron mediciones del volumen de agua destilada, temperaturas, irradiancia solar global y calidad de agua destilada, antes y después de la evaluación.

Los resultados obtenidos experimentalmente indican una buena cantidad aceptable de agua destilada por el método DST, obteniéndose un volumen medio de $2,5 \frac{l}{m^2} día$; con un máximo volumen de $3,6 \frac{l}{m^2} día$ y un mínimo de $0,93 \frac{l}{m^2} día$.

El destilador solar tubular (DST) tiene una eficiencia de 47% en términos de procesamiento de agua destilada.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Tacna presenta escasez de agua potable, esa fue la razón que motivó la presente investigación; en destilar el agua de mar; usando energía solar.

Existen varias técnicas de destilación como: Destilación Multietapa Flash, Ósmosis Inversa y otros, y la más difundida a nivel mundial, es la Ósmosis Inversa. Las técnicas mencionadas requieren de gran cantidad de energía y mano de obra calificada para su operación y mantenimiento, además de sus altos costos de instalación, razón por la cual la investigación está orientada a la destilación solar.

Otra de las razones por la que la investigación está orientada a la destilación de agua de mar, es que hay energía solar en abundancia en la ciudad de Tacna, entonces la presente investigación tiene por objetivo diseñar, construir y evaluar un Destilador Solar Tubular de Agua de Mar.

El trabajo consta de cinco capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación. El primer capítulo trata sobre el planteamiento del problema; en el segundo capítulo se aborda el fundamento teórico, donde se expone los procesos de destilación solar, empleando como fuente energética la energía solar y se realiza un balance de energía y masa del DST; en el tercer capítulo, se describen los materiales, instrumentos y métodos, con énfasis especial en el material usado para la construcción del DST, y los instrumentos y equipos usados para la evaluación correspondiente. El cuarto capítulo está dedicado a los datos experimentales y resultados; donde se muestra el comportamiento térmico, energético y másico del DST. Finalmente, se expresaran las conclusiones y recomendaciones.

La presente investigación fue impulsada por la problemática hídrica de la ciudad de Tacna; CERT brindó la infraestructura y los equipos e instrumentos necesarios para la caracterización correspondiente. Los resultados alcanzados son aceptables y pueden contribuir a una solución alternativa para mitigar la escasez del recurso hídrico regional (zona costera).

CAPÍTULO I

PLANEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento del problema

La crisis hídrica en la ciudad de Tacna está llegando a niveles alarmantes (pmgrh, 2008), esto indicaría escasez de agua en los próximos años, la población y la agricultura comenzarían a sentir los estragos y sería el principal limitante de su desarrollo regional.

El represamiento de Paucarani a 4550 m.s.n.m. en la subcuenca de la quebrada Cairani, regula y almacena las aguas de las quebradas Carpate, Achuco, Auquitape y Curimani, contando con un volumen útil de $8,5 \times 10^6 \text{m}^3$, siendo el principal abastecedor del recurso hídrico para la ciudad de Tacna.

La provincia de Tacna requiere de $470 \frac{l}{s}$ para subsistir; sin embargo, las reservas solo pueden brindar $370 \frac{l}{s}$, existiendo un déficit de $100 \frac{l}{s}$ de agua para uso. La agricultura pasa por el mismo problema, esta actividad requiere de $450 \frac{l}{s}$ de agua, pero actualmente sólo se le está brindando $400 \frac{l}{s}$, existiendo un déficit de $50 \frac{l}{s}$.

Para superar esta problemática hídrica se propone la destilación de agua de mar aprovechando la energía solar. Para la contribución a la solución de la problemática que pueda cubrir la demanda hídrica no satisfecha de la población de Tacna.

1.2. Formulación del problema

Teniendo en cuenta la crisis hídrica de la ciudad de Tacna y las posibles alternativas de solución, se plantea la siguiente pregunta:

¿Es factible, diseñar, construir y caracterizar un destilador solar tubular para desalinizar el agua de mar?

1.3. Justificación de la investigación

Siendo una amenaza la contaminación, el crecimiento poblacional, la creciente urbanización, la industrialización, los usos no sostenibles de recursos naturales y el cambio climático, originándose por el uso de combustibles fósiles; la provisión de agua dulce ya no cubre la demanda mundial y además se encuentra mal distribuida. Teniendo en cuenta la problemática hídrica regional, la destilación solar de agua mar, es una alternativa para solucionar esta crisis, toda vez que, en Tacna, se tiene un buen potencial energético solar global en niveles que nos permite utilizar diferentes tecnologías que utilicen como fuente energética la energía solar, bajo su aprovechamiento y desarrollo sostenible.

a) Justificación económica - ambiental

La fuente energética de un destilador solar tubular, es gratuita ya que utiliza energía limpia e inagotable del sol. El único costo que demanda es su inversión inicial; el destilador solar tubular contribuye a no usar combustibles fósiles (el carbón y todos los derivados del petróleo) los que al ser empleados para obtener energía, liberan varias sustancias químicas a la atmósfera (la mayor parte en forma de gases), conocidas como *gases de efecto invernadero*, que inciden negativamente sobre la salud de la población.

b) Justificación social

La construcción de un destilador solar tubular para tratar agua de mar, técnicamente es sencilla, ya que su principio general de funcionamiento está basado en el efecto invernadero y su uso masivo reduciría notablemente el uso de combustibles fósiles, reduciendo así, la contaminación ambiental, el peligroso calentamiento de la tierra por efecto invernadero; y puede contribuir a la solución alternativa del problema hídrico regional, en la medida de su eficiencia y volumen de destilación de agua de mar bajo las condiciones de irradiación solar global de la región Tacna, son eficiente y técnicamente viables.

c) Justificación técnica

La presentación del destilador solar tubular es muy flexible por su técnica de armado y de transporte, su uso es recomendable para las zonas donde haya una buena irradiación solar, como es el caso de nuestro litoral tacneño. Puede constituirse en una alternativa para solucionar la problemática de escases de recurso hídrico a nivel local, regional. Al usar tubos de vidrio, y según los resultados, puede dar lugar a que las empresas fabriquen estos dispositivos, generando puesto de trabajo.

1.4.Objetivos

a) Objetivo general

- Diseñar, construir y caracterizar un destilador solar tubular para desalinizar agua de mar.

b) Objetivos específicos

- Diseñar un destilador solar tubular.
- Construir un destilador solar tubular.
- Caracterizar el destilador solar tubular.
- Determinar el volumen de agua destilada.
- Analizar físicamente y químicamente el agua de mar antes y después de la destilación solar.

1.5.Hipótesis

Es factible diseñar, construir y caracterizar un destilador solar tubular para desalinizar agua de mar.

1.6.VARIABLES DE ESTUDIO

Para el análisis del estudio preliminar, se consideran las siguientes variables:

a) Variables independientes

- Irradiancia solar global
- Temperatura y humedad relativa en el interior del DST.

b) Variables dependientes

- Volumen de agua destilada.
- Caracterización del DST.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.- Introducción

Con la desalación se puede separar el agua de las sales o viceversa. Por lo tanto, en esta investigación se detallará los métodos de destilación que se refiere a la obtención de agua destilada. Las siguientes clasificaciones se harán según el tipo de energía utilizada para el proceso, La tabla 2.1 muestra dicha clasificación según los métodos existentes:

Tabla 2.1. Métodos de destilación existentes en el mercado.

Obtención	Energía	Proceso	Método
Agua destilada de agua de mar	Térmica	Evaporación	Destilación súbita (flash)
			Destilación multiefecto
			Termocompresión de vapor
			Destilación solar
	Mecánica	Filtración Evaporación	Destilación con membranas
			Evaporación
		Filtración	Ósmosis Inversa

Fuente: Elaboración propia

Antes de describir y explicar, se detallará uno de los métodos de destilación que aparecen en este capítulo, es necesario centrar la atención en el consumo energético necesario para obtener agua dulce en condiciones de potabilidad.

Si obtiene agua destilada evaporando el agua de mar, la cantidad de energía necesaria para dicho cambio de fase es nada menos que 2,258 kJ/kg a una presión atmosférica o 0,627 kWh/kg, alrededor de S/. 0,09956 por litro de agua destilada.

Lógicamente, a este precio sólo podría pagarse el agua para la ingestión, pero no para el resto de consumo cotidiano.

A continuación se da una breve descripción de los procesos de destilación existentes en la actualidad, incidiendo de forma más detallada en aquellos más extendidos en la industria destiladora.

2.2.- Métodos de destilación

2.2.1. Destilación súbita por efecto flash (MSF).

El proceso de destilación súbita por efecto flash es el primer proceso desalador por destilación digno de mencionar. La desalación obtenida por destilación consiste en evaporar agua para conseguir vapor que no contiene sales (éstas son volátiles a partir de 300° C): el vapor se condensa posteriormente en el interior o exterior de los tubos de la instalación.

La utilización de una cámara flash permite una evaporación súbita (y por lo tanto de carácter irreversible) previa a su posterior condensación. Generalmente, la cámara flash se sitúa en la parte baja de un condensador de dicho vapor generado en la cámara inferior.

Por lo tanto, la recuperación de calor necesario para la evaporación se obtiene gracias a la unión sucesiva de etapas en cascada a diferente presión, y es necesario el aporte mínimo de la condensación de un vapor de baja o media calidad proveniente de una planta de generación eléctrica. La figura 2.1 muestra el esquema típico de una planta de evaporación súbita por efecto flash (MultiStage Flash Distillation, MSF).

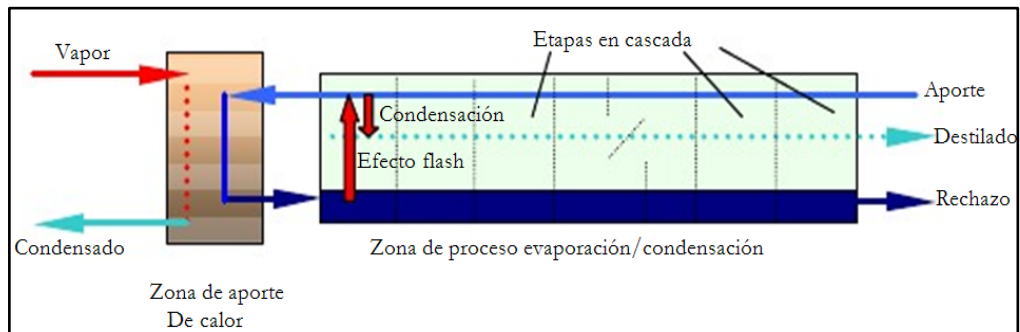


Figura 2.1. Esquema de una planta de evaporación súbita por efecto flash.

Fuente:(CERCI, 2001, p. 14).

Posteriormente, se verá el proceso evaporativo más utilizado en el mundo, y sobre todo en el Medio Oriente. Ello se debe a varias razones siguientes:

- ✓ Es especialmente válido cuando la calidad del agua bruta no es buena (alta salinidad, temperatura y contaminación del agua aportada).
- ✓ Su acoplamiento con plantas de potencia para formar sistemas de cogeneración es muy fácil y permite una gran variabilidad de rangos de operación en ambas plantas.
- ✓ Su robustez en la operación diaria frente a otros procesos de destilación es notoria.
- ✓ La capacidad de las plantas MSF es mucho mayor que otras plantas destiladoras, en virtud a la cantidad de etapas conectadas en cascada sin problemas de operación.

Sin embargo, las plantas MSF tienen un grave inconveniente. Su consumo específico, definido como la cantidad de energía consumida para producir 1m^3 de agua destilada, es de los más altos de los procesos estudiados. A este consumo contribuyen el consumo térmico proveniente de la planta productora de electricidad, más alto que otros procesos de destilación debido al efecto flash; y el consumo eléctrico debido al gran número de bombas necesarias para la circulación de los flujos de planta.

2.2.2. Destilación por múltiple efecto (MED)

Al contrario que en el proceso MSF por efecto flash, en la destilación por múltiple efecto (MED) la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo. Una planta MED (Multi Effect Distillation) tiene varias etapas conectadas en serie a diferentes presiones de operación (ver figura 2.2), dichos efectos sucesivos tienen cada vez un punto de ebullición más bajo por el efecto de dicha presión. Esto permite que el agua de alimentación experimente múltiples ebulliciones, en los sucesivos efectos, sin necesidad de recurrir a calor adicional a partir del primer efecto. El agua salada se transfiere luego al efecto siguiente para sufrir una evaporación y el ciclo se repite, utilizando el vapor generado en cada efecto. Normalmente, también existen cámaras flash para evaporar una porción del agua salada que pasa al siguiente efecto, gracias a su menor presión de operación.

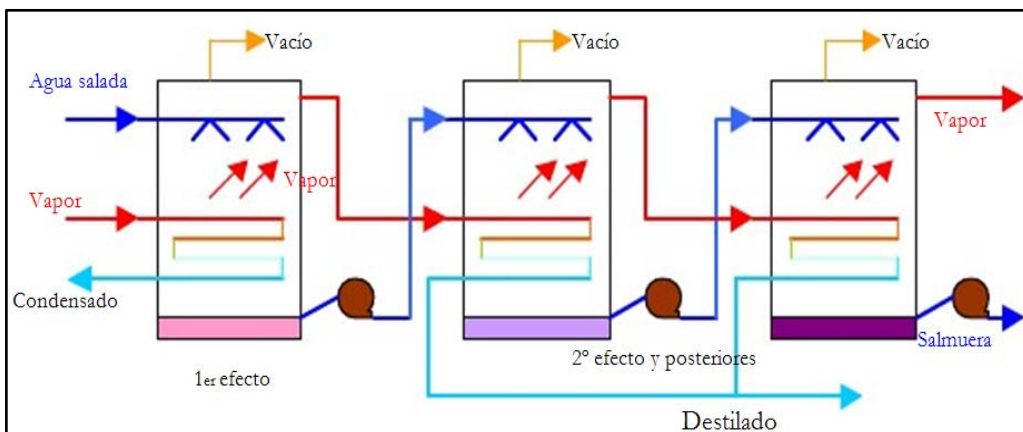


Figura 2.2. Destilación múltiple efecto (MED) con evaporadores horizontales (HFF)

Fuente:(CERCI, 2001, p. 20)

La primera etapa se nutre de vapor externo de un sistema recuperativo, una turbina de contrapresión (o extracción de una de condensación). Un condensador final recoge el agua dulce en la última etapa precalentando el agua de aportación al sistema.

Por lo tanto, las plantas MED también conforman sistemas de cogeneración al igual que las MSF consumiendo una porción de energía destinada a priori a la producción eléctrica.

La destilación por múltiple efecto no es un proceso solamente utilizado para la desalación. La industria azucarera utiliza constantemente destiladores de múltiple efecto, aunque en este caso el propósito no es obtener agua destilada sino concentrar mezclas de otra naturaleza a la estudiada aquí.

La capacidad de este tipo de plantas suele ser más reducida que las MSF es decir nunca suele superar los 15 000 m³/día (**Al-Shammiri y Safar, 1999**), aunque ello se debe más a razones de índole política que operativa: las MSF más grandes se instalan en Oriente Medio y las mayores MED están instaladas en las islas del Caribe para abastecer de agua estas zonas de gran presión turística.

También es verdad que el número máximo de efectos conectados en serie raramente es mayor de 15, a excepción de las MED con múltiples efectos integrados en cada uno de ellos, llegando en este caso a un número total de más de 50.

Sin embargo, tienen un mejor rendimiento global con respecto a una MSF

Además, el consumo eléctrico es menor que la MSF ya que necesita menos bombas de circulación al no existir recirculación de salmuera.

Esto implica que el proceso en el contexto mundial de la destilación es mucho menor que el de las MSF o la ósmosis inversa (OI) que se comentará posteriormente.

2.2.3. Compresión térmica de vapor(TVC)

La compresión térmica de vapor (TVC, Thermal Vapor Compression) obtiene el agua destilada con el mismo proceso que una destilación por múltiple efecto (MED), pero utiliza una fuente de energía térmica diferente: son los llamados compresores térmicos (o termocompresores), que consumen vapor de media presión proveniente de la planta de producción eléctrica (si tenemos una planta dual, sino sería de un vapor de proceso obtenido expresamente para ello) y que succiona parte del vapor generado en la última etapa a muy baja presión, comprimiéndose y dando lugar a un vapor de presión intermedia a las anteriores, adecuado para aportarse a la 1ª etapa, según se recuerda era la única que consume energía en el proceso.

La figura 2.3 muestra la configuración típica de una planta TVC con intercambiadores de tubos horizontales (lógicamente los tipos de intercambiadores son idénticos a los del proceso MED).

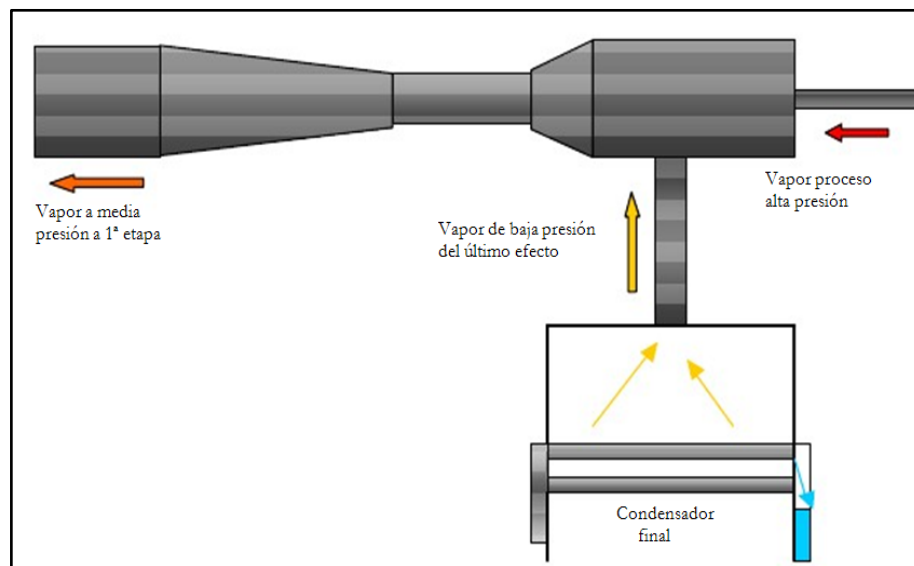


Figura 2.3. Esquema típico del termocompresor acoplado a una planta TVC

Fuente:(CERCI, 2001, p. 25)

El rendimiento de este tipo de plantas es similar a las de las plantas MED, sin embargo, su capacidad desaladora puede ser mucho mayor al permitirse una mayor adaptabilidad de toma de vapor de las plantas productoras del mismo. Muchas veces se las considera el mismo proceso que el MED, pero aquí se tratarán individualmente ya que el consumo de energía de la planta se realiza por un equipo diferente.

2.2.4. Destilación solar

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. A pesar de tener un coste energético nulo y costo de inversión, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector al destilarse tan sólo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables. Por lo tanto, no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce.

Hay varias formas de producir agua dulce usando la energía solar, en este párrafo se relacionará a la destilación por colectores (ver figura 2.4). El principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina inferior de salmuera. Aunque pueden utilizarse técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes o espejos (parabólicos o lisos), no suelen compensar las mayores pérdidas de calor que ello acarrea y su mayor costo económico (**Nafey AS, Sharaf MA, García L**, 2010).

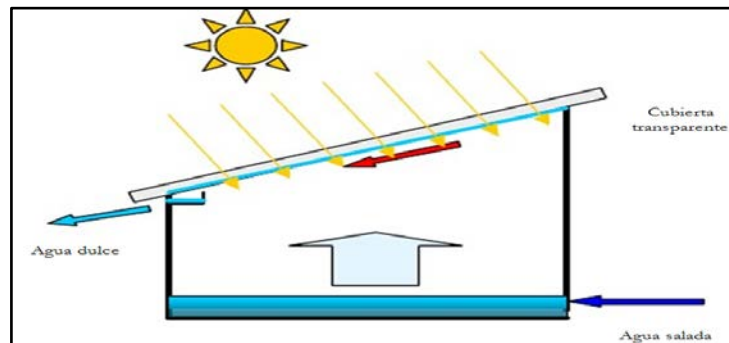


Figura 2.4. Esquema de un colector solar para destilación.
Fuente:(CERCI, 2001, p. 27)

Pero la energía solar también puede ser la fuente de energía de un proceso de destilación, incluso de producción eléctrica para pequeñas instalaciones de ósmosis inversa. Por ejemplo, el uso de colectores de concentración parabólicos (CCP) puede usarse en procesos MSF o MED dependiendo del costo de los colectores, que son los que determinan la producción de agua por metro cuadrado de PTC (de media producen 10 m³ de agua dulce por m² de colector) y factores climáticos tales como el porcentaje del día en que la planta consume energía solar (factor solar SF) (García, 1999; García, Palmero y Gómez, 1999). Como se puede ver el gran problema de estas instalaciones es que no evita la instalación convencional para producir agua dulce en circunstancias climatológicas adversas.

Un reciente estudio de recopilación de plantas de destilación solar muestra una realidad el total de capacidad instalada a escala mundial supera los 10 000 m³/día, generalmente, con colectores parabólicos acoplados a pequeñas unidades MSF o MED (García y Gómez, 2000). Actualmente existe una producción de más de 24 millones de metros cúbicos diarios de agua desalada en todo el mundo (**Kumar S, Tiwari GN, 1996**), lo que supone el abastecimiento de más de 100 millones de personas. La primera planta desaladora en España se ubicó en Lanzarote en 1965 y actualmente existen más de 700 plantas desaladoras en todo el mundo.

2.2.5. Destilación por membranas

Es un proceso combinado de evaporación y filtración. El agua salada bruta se calienta para mejorar la producción de vapor, que se expone a una membrana que permite el paso de vapor, pero no del agua (membrana hidrófoba).

Después de atravesar la membrana el vapor se condensa sobre una superficie más fría, para producir agua destilada.

En estado líquido, esta agua destilada no puede retroceder atravesando la membrana, por lo que es recogida y conducida hacia la salida.

Desafortunadamente, este proceso sólo ha sido desarrollado a nivel de laboratorio por varios grupos de investigación científica (uno de ellos español, de la Universidad de Málaga; García y Florido, 2000), aunque sus perspectivas son francamente esperanzadoras.

2.2.6. Compresión mecánica de vapor(CV)

En la compresión mecánica de vapor (CV) evapora un líquido, en este caso el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, y se comprime lo suficiente para que condense en el otro lado y pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando las pérdidas del proceso y la elevación de la temperatura de ebullición del agua salada respecto a la pura (Boiling Point Elevation, BPE).

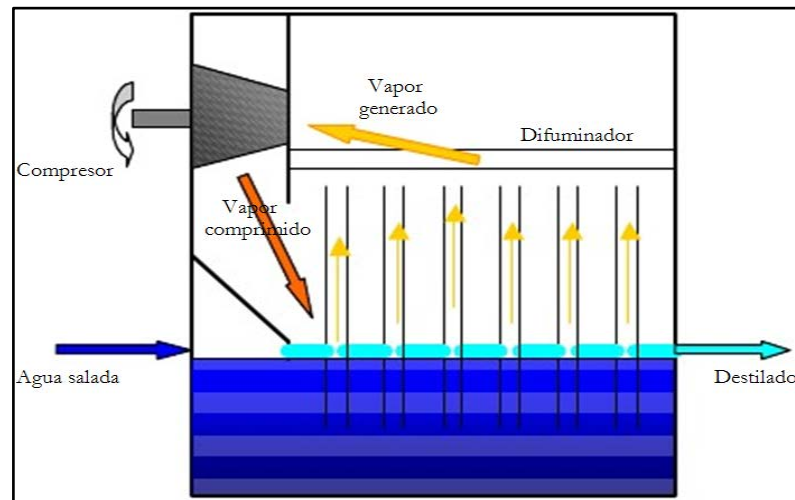


Figura 2.5. Diagrama de la compresión de vapor (CV) con evaporador de tubos verticales
Fuente:(CERCI, 2001, p. 31).

En la figura 2.5 podemos ver el esquema de un compresor de vapor acoplado a un intercambiador de tubos verticales (VTE) de una única etapa.

Simplificando todos los elementos auxiliares se puede observar que el vapor interior de los tubos es comprimido a presión atmosférica en torno a 0,2 bares (un sobrecalentamiento de unos 5° C) en un compresor volumétrico especial para trasegar vapor. El vapor ligeramente sobrecalentado se condensa en el exterior de los tubos del intercambiador, siendo recogido por una bomba en su parte inferior. Como puede observarse, si el proceso fuera ideal sólo deberíamos vencer la BPE para mantener el proceso, aunque no es posible realmente (hay pérdidas de calor y presión, fricciones en las bombas de circulación, etc.); en todo caso el consumo específico de estas instalaciones es el más bajo de los procesos de destilación: normalmente el consumo eléctrico equivalente está sobre los 10 kWh/m³ (la mitad que una planta MSF).

Aunque su consumo específico es menor, pero tiene un gran inconveniente: la inexistencia de compresores volumétricos de vapor de baja presión de tamaño suficiente para una producción considerable. Así no se conocen unidades CV mayores de 5 000 m³/día, y estos compresores sólo permiten un máximo de 3 etapas a diferentes presiones conectadas en cascada (si fueran necesarias más etapas harían falta instalar nuevos compresores). Normalmente, existen intercambiadores de precalentamiento del agua de aporte con el destilado y la salmuera tirada al mar (como el número de etapas es reducido hay que recuperar la energía de salida de la salmuera), ayudados por una resistencia eléctrica en los arranques, así como todos los dispositivos de tratamiento de agua anteriores y posteriores al proceso de destilación.

Finalmente, reseñar que la compresión mecánica de vapor es un proceso muy utilizado en la industria, generalmente en procesos de concentración de la industria alimentaria (**Nafey AS, Sharaf MA, García L, 2010**).

2.2.7. Ósmosis inversa

La ósmosis es un proceso natural que ocurre en plantas y animales. De forma esquemática (figura 2.6) podemos decir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones se unen a través de una membrana semipermeable (es decir, permite el paso de agua pero no de sales), existe una circulación natural de la solución menos concentrada para igualar las concentraciones finales, con lo que la diferencia de altura obtenida (se supone los recipientes de cada soluto al mismo nivel inicial) se traduce en una diferencia de presión, llamada osmótica.

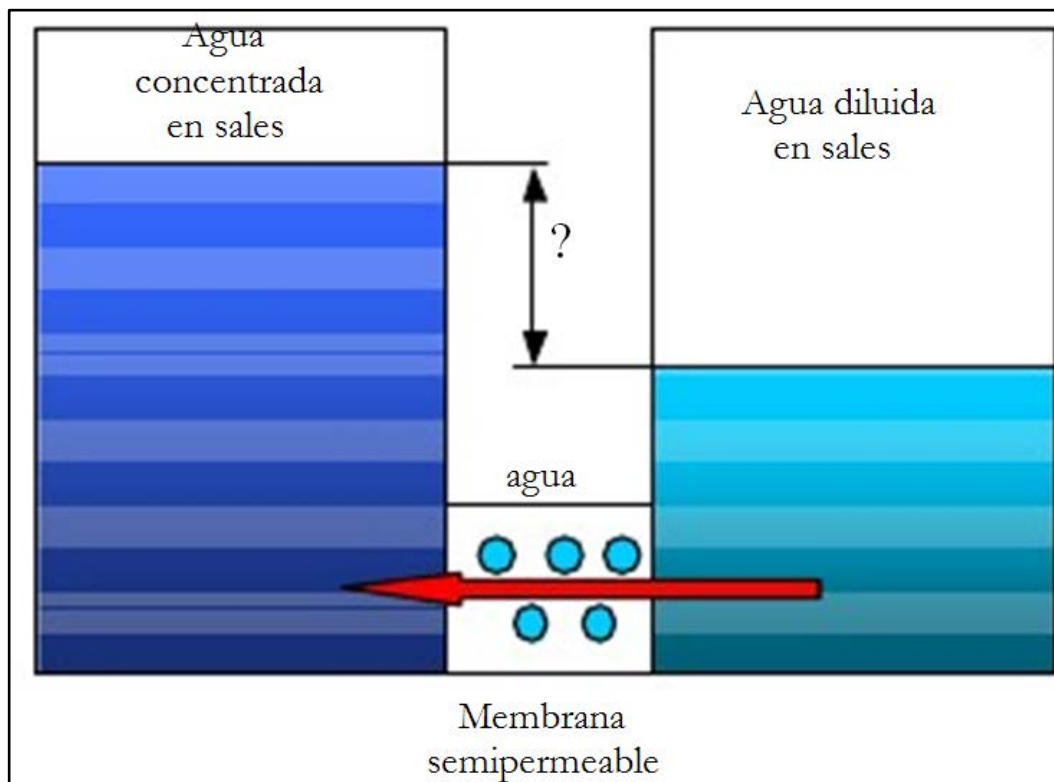


Figura 2.6. Proceso natural de ósmosis.
Fuente:(CERCI, 2001, p. 35).

Sin embargo, aplicando una presión externa que sea mayor a la presión osmótica de una disolución respecto de otra, el proceso se puede invertir, haciendo circular agua de la disolución más concentrada y purificando la zona con menor concentración.

Obteniendo finalmente un agua de pureza admisible, aunque no comparable a la de procesos de destilación. Por eso es altamente recomendable para la filtración de aguas salobres, en las que la sal a rechazar es mucho menor que en aguas marinas. La cantidad de permeado depende de la diferencia de presiones aplicada a la membrana, sus propiedades y la concentración del agua bruta, y la calidad del agua permeada suele estar en torno a los 300- 500 ppm de TDS, cifra un orden de magnitud mayor al agua obtenida en un proceso de evaporación.

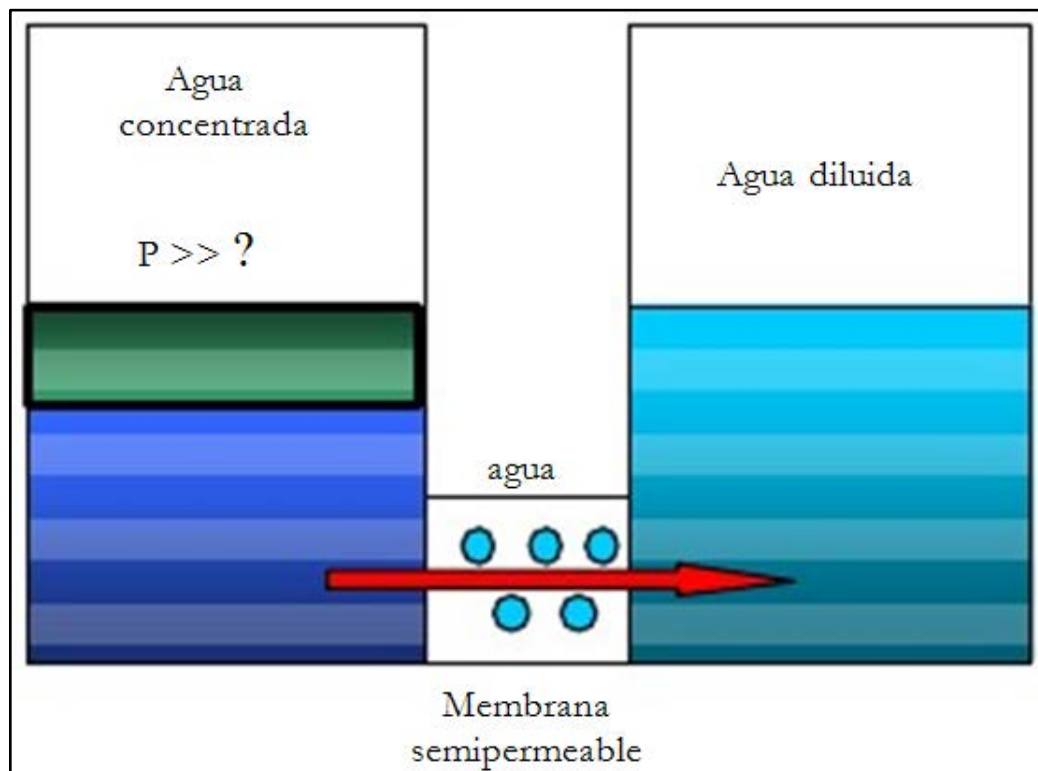


Figura 2.7. Proceso de ósmosis inversa.
Fuente:(CERCI, 2001, p. 36).

Una membrana para realizar osmosis inversa debe resistir presiones mucho mayor a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones. Por ejemplo, un agua bruta de 35 000 ppm de TDS a 25°C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero son necesarios 70 bar para ser permeable). Además, debe ser permeable al agua para permitir el flujo y rechazar un porcentaje elevado de sales.

Sin embargo, no se puede considerar la Oi como un proceso de filtración normal, ya que la dirección de flujo del agua bruta es paralela y no perpendicular como un caso cualquiera de filtración. Ello implica que tan sólo una parte del agua bruta de alimentación pasa realmente a través de la membrana (un proceso de filtración lo haría en su totalidad), y que no se acumulen sales en la membrana al arrastrarse por el agua bruta que no pasa por la membrana.

El proceso de ósmosis inversa es tan simple que a priori solo son necesarias las membranas que filtren el contenido salino y el equipo presurizador.

Pero una planta de OI es mucho más compleja que una agrupación de módulos y una o varias bombas, por ejemplo las membranas se ensucian muy fácilmente con la operación continuada y necesita un pre tratamiento intensivo (mucho mayor que en los procesos de destilación), que comprende entre otros (ver figura 2.8):

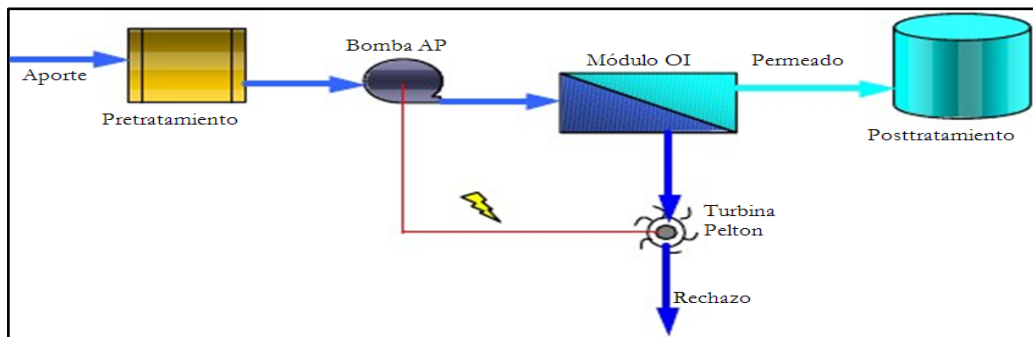


Figura 2.8. Desalación por ósmosis inversa (OI) con turbina Pelton incorporada

Fuente:(CERCI, 2001, p. 38).

- ✓ Clorado para reducir la carga orgánica y bacteriológica del agua bruta.
- ✓ Filtración con arena para reducir la turbidez.
- ✓ Acidificación para reducir el pH y limitar la formación de depósitos calcáreos.
- ✓ Inhibición con polifosfatos de la formación de sulfatos de calcio y bario.
- ✓ Declorado para eliminar el cloro residual.
- ✓ Cartuchos de filtrado de partículas requeridos por los fabricantes de membranas.
- ✓ Microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) en el caso de aplicaciones industriales muy específicas o en reutilización de aguas residuales (ver apartado 10 para su descripción).

- ✓ Estos procesos no son específicamente de desalación, por lo que no se incluyen en este apartado.

El pos tratamiento en una planta de este tipo sólo suele ser un tratamiento complementario para conseguir las condiciones de potabilidad requeridas.

El proceso de ósmosis inversa es predominante en el mundo. Las razones de su imposición con respecto a otras tecnologías son las siguientes:

- ✓ El consumo eléctrico específico de una instalación de ósmosis inversa es el menor de los estudiados hasta ahora (6-8 kWh/m³), pero se puede aprovechar la energía contenida en la salmuera rechazada a alta presión para rebajar esa cifra hasta por debajo de 3 kWh/m³. Ello supone un costo económico menor de S/.0,4978/m³, considerando un costo de la electricidad de S/.0,15930/kWh.
- ✓ Al ser un proceso de filtración, el costo energético depende de la concentración del agua bruta, cosa que no ocurre en las tecnologías de evaporación.
- ✓ Permite una adaptabilidad mayor que otras plantas a una ampliación de su capacidad si la demanda es creciente en la zona.
- ✓ Los costos de inversión de una instalación de OI están por debajo de otras tecnologías de destilación.

Sin embargo, las limitaciones tecnológicas asociadas a las membranas con algunos tipos de aguas marinas impiden su implantación total en el resto del mundo (**Hernández M**, 2003).

2.2.8. Resumen

Después de una detallada exposición de los diferentes procesos de destilación existentes, tan sólo unos pocos procesos de destilación son tecnológicamente viables actualmente a escala industrial: Evaporación súbita por efecto flash (MSF), destilación múltiple efecto (MED), termo compresión de vapor (TVC) y compresión de vapor mecánica (CV), ósmosis inversa (OI).

Tabla 2.2. Valoración de diferentes características deseables para los métodos de destilación existentes en el mercado

Característica	MSF	MED-TVC	CV	OI
Tipo energía	térmica	térmica	eléctrica	eléctrica
Consumo energético (kJ/kg)	alto (>200)	alto/medio (150-200)	medio (100-150)	bajo (<80)
Coste instalaciones	alto	alto/medio	alto	medio
Capacidad producción (m ³ /día)	alta (>50.000)	media (< 20.000)	baja (<5.000)	alta (>50.000)
Posibilidad ampliación	difícil	difícil	difícil	fácil
Fiabilidad de operación	alta	media	baja	alta
Destilación agua de mar	sí	sí	sí	sí
Calidad agua destilada (ppm)	alta (< 50)	alta (< 50)	alta (< 50)	media (300-500)
Superficie terreno requerida para la instalación	mucha	media	poca	poca

Fuente:(CERCI, 2001, p. 42).

A modo de recopilación es conveniente realizar un análisis comparativo de las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos métodos tecnológicamente avanzados para la producción de agua desalada.

La tabla 2.2 muestra la valoración de todos los métodos comentados anteriormente frente a ciertas características exigibles a un método destilador.

A la vista de esta tabla, queda claro que la ósmosis inversa es en conjunto la tecnología más favorable en el mundo, en base a su mejor precio de obtención del agua, su extensa, y su fiabilidad. Tan sólo la calidad del agua es peor que el resto de tecnologías, si no se contempla la posibilidad de añadir un segundo paso para reducir esa concentración salina residual tras un único paso por las membranas.

2.3.- Procesos de transferencia de calor

2.3.1. Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. El aire es un mal conductor del calor. Los objetos malos conductores como el aire o plásticos se llaman aislantes.

La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un volumen de espesor Δx , con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes T_1 y T_2 , con $T_2 > T_1$, como se muestra en la figura 2.9, se encuentra que el calor ΔQ transferido en un tiempo Δt fluye del extremo caliente al frío.

Si se llama H (en Watts) al calor transferido por unidad de tiempo, la rapidez de transferencia de calor $H = \Delta Q / \Delta t$, está dada por la ley de la conducción de calor de Fourier.

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde k (en W/mK) se llama conductividad térmica del material, magnitud que representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura; y dT/dx es el gradiente de temperatura. El signo menos indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura. En la tabla 2.3 se listan valores de conductividades térmicas para algunos materiales, los altos valores de conductividad de los metales indican que son los mejores conductores del calor.

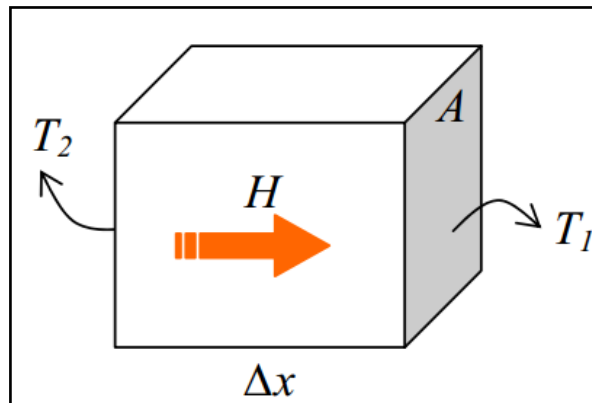


Figura 2.9 transferencia de calor por conducción
Fuente:(dunkle,R.V).

Tabla 2.3 Algunos valores de conductividades térmicas.

Metales, a 25°C		Gases, a 20°C		Otros materiales	
Sustancia	k (W/mK)	Sustancia	k (W/mK)	Sustancia	k (W/mK)
Aluminio	238	Aire	0,0234	Asbesto	0,08
Cobre	397	Helio	0,138	Concreto	0,8
Oro	314	Hidrógeno	0,172	Diamante	2300
Hierro	79,5	Nitrógeno	0,0234	Vidrio	0,84

Fuente: (dunkle,R.V).

Si un material en forma de barra uniforme de largo L , protegida en todo su largo por un material aislante, como se muestra en la figura 2.10.

Cuyos extremos de área A están en contacto térmico con fuentes de calor a temperaturas T_1 y $T_2 > T_1$, cuando se alcanza el estado de equilibrio térmico, la temperatura a lo largo de la barra es constante.

En ese caso el gradiente de temperatura es el mismo en cualquier lugar a lo largo de la barra, y la ley de conducción de Calor de Fourier se puede escribir en la forma siguiente:

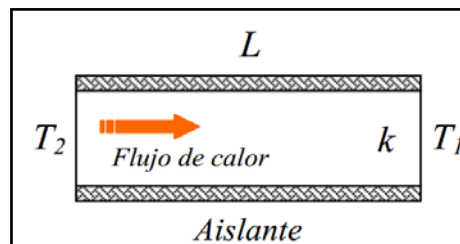


Figura 2.10 aislante

$$H = kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (2)$$

2.3.2. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección.

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente:

$$H = hA(T_A - T)$$

Donde h se llama coeficiente de convección, en $W/(m^2K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , como se muestra en el esquema de la figura 2.11 y La tabla 2.4 se muestra algunos valores aproximados de coeficiente de convección h .

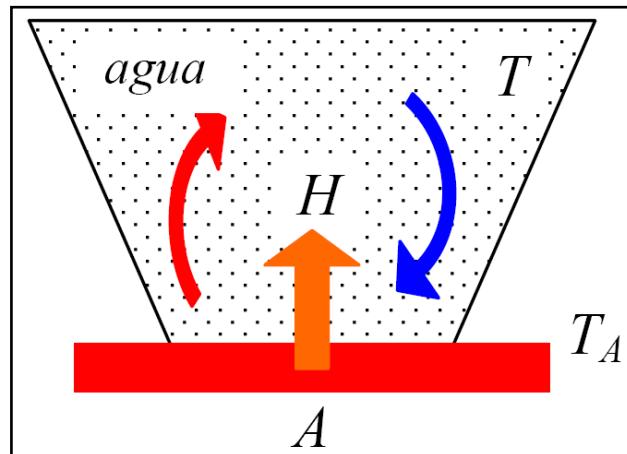


Figura 2.11 transferencia de calor por convección
Fuente: (dunkle,R.V).

El flujo de calor por convección es positivo ($H > 0$) si el calor se transfiere desde la superficie de área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$).

Tabla 2.4 Valores típicos de coeficiente de convección.

Proceso	h (W/m^2K)
Convección libre	
Gases	2 A 25
Líquidos	50 A 1000
Convección FORZADA	
Gases	25----250
Líquidos	50-----2000

Fuente: (dunkle, R.V).

Radiación

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas y transportadas por ondas electromagnéticas o fotones, por lo que recibe el nombre de radiación electromagnética. La masa en reposo de un fotón (que significa luz) es idénticamente nula. Por lo tanto, atendiendo a relatividad especial, un fotón viaja a la velocidad de la luz y no se puede mantener en reposo. (La trayectoria descrita por un fotón se llama rayo). La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\lambda\nu=c$, son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío con una rapidez constante $c = 299792 \text{ km/s}$, llamada velocidad de la luz.

Los fotones son emitidos o absorbidos por la materia. La longitud de onda de la radiación está relacionada con la energía de los fotones, por una ecuación desarrollada por Planck:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Donde h se llama constante de Planck, y su valor es $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js.

Leyes de radiación

Ley de Stefan

Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea su temperatura, por ejemplo el Sol, la Tierra, la atmósfera, los Polos, las personas, etc.

La energía radiada por el Sol a diario afecta nuestra existencia en diferentes formas. Esta influye en la temperatura promedio de la tierra, las corrientes oceánicas, la agricultura, el comportamiento de la lluvia, etc.

Considerar la transferencia de radiación por una superficie de área A , que se encuentra a una temperatura T . La radiación que emite la superficie, se produce a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie. La rapidez a la cual se libera energía se llama potencia de radiación H , su valor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esto se conoce como la ley de Stefan (Joseph Stefan, austriaco, 1835-1893), que se escribe como:

$$H = \epsilon\sigma AT^4 \quad (4)$$

Donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ W/(m²K⁴) se llama constante de Stefan-Boltzmann (Ludwing Boltzmann, austriaco, 1844-1906) y ϵ es una propiedad radiativa de la superficie llamada emisividad, sus valores varían en el rango $0 < \epsilon < 1$, es una medida de la eficiencia con que la superficie emite energía radiante, depende del material.

2.4.- Potencial de Hidrogeno (pH)

El agua, aunque sea pura, dista mucho de ser un simple conjunto de moléculas H_2O . Aún cuando en la práctica se asume que el agua químicamente pura no conduce la corriente eléctrica, equipos de medición muy precisos, han logrado detectar ligeros niveles de conductividad eléctrica.

Esto, según las teorías de Arrhenius, se debe a la presencia de iones (cationes y aniones) en el agua, en otras palabras, el agua se "auto-ioniza" o "auto-disocia" a través de una reacción química reversible denominada auto protolisis como se muestra en la figura 2.12:

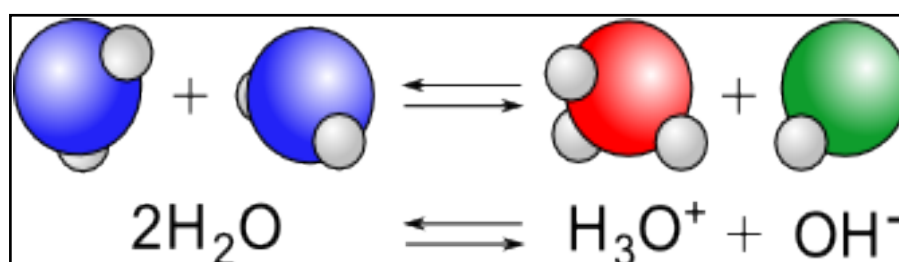


Figura 2.12. Reacción química de pH.

Fuente: UNRC, facultad ciencias exactas (2012).

El auto protolisis puede definirse como el equilibrio químico entre moléculas de H_2O , su catión H_3O^+ (ion hidronio) y su anión OH^- (ion hidroxilo).

El ion hidronio H_3O^+ es en realidad un protón hidratado, es decir, un ion hidrógeno H^+ unido a una molécula de agua. Hoy se sabe que no existen protones libres en una solución, todos están hidratados, sin embargo, se les puede referir indistintamente.

En el agua pura (solvente), a temperatura ambiente ($25^\circ C$), la concentración molar (molaridad) del ion hidronio (soluto) es:

$$[H_3O^+] = 1 \times 10^{-7} \text{ moles/litro} \quad (5)$$

En otras palabras, hay un ión hidronio por cada 555 millones de moléculas de agua pH. En la figura 2.13 se muestra la distribución de pH.

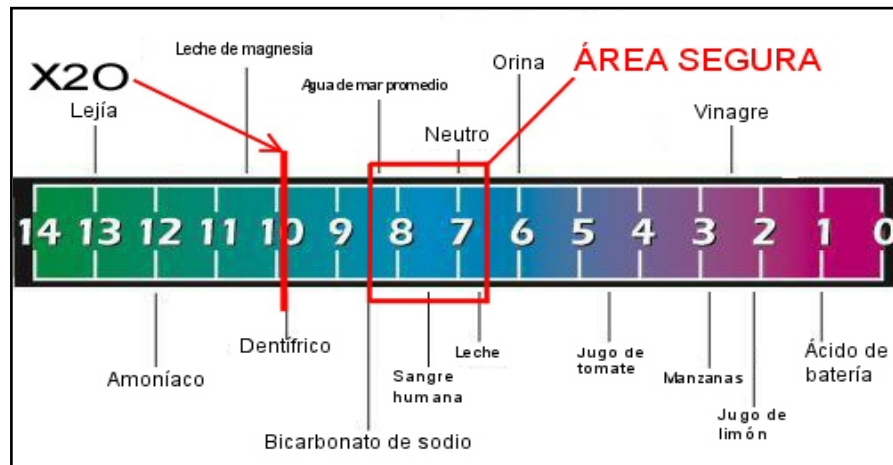


Figura 2.13. Esquema de la redistribución de pH.
Fuente: UNRC, facultad ciencias exactas (2012).

Así como el kilómetro es una medida de distancia, y la hora también es una medida del tiempo, el pH es una medida de grado de acidez o alcalinidad de una solución. La fórmula matemática para calcular el pH es:

$$pH = -\log[H_3O^+] \quad (6)$$

Como se observa, el pH es el logaritmo natural negativo de la concentración molar de iones. “ H_3O^+ ” en una solución. El pH es un número y no tiene unidades.

Todas las soluciones acuosas tienen pH, el rango de medición varía entre $pH = 0$ y $pH = 14$:

- ✓ Las soluciones con un pH menor a 7 tienen propiedades ácidas.
- ✓ Las soluciones con un pH igual a 7 son consideradas neutras.
- ✓ Las soluciones con un pH mayor a 7 tienen propiedades básicas o alcalinas.

La escala de pH va desde los ácidos más fuertes a las bases más fuertes.

Si la parte entera en la notación científica es igual a 1, el pH será el valor absoluto del exponente de la base 10, así para una molaridad de: 1×10^{25} moles/litro, el pH es igual a 2.5.

El pH es una característica muy importante que tienen todas las tierras, los sustratos para macetas, jardineras, etc. y las aguas de riego. El mejor pH para la mayoría de las plantas, oscila entre 6,5 y 7, es decir, neutro. Algunas, llamadas acidófilas, tienen un pH inferior a 6, y otras (calcícolas), poseen un pH superior a 7.

Se ha determinado que el pH de la piel húmeda ronda en un 5,5 por lo que si nos aplicamos alguna crema o jabón con un pH menor o mayor podría causarnos irritación o quemadura. Si se tratara de un pH mayor a 10 o menor a 3, la piel pudiera disolverse causándonos un gran daño. Saber cuál es el pH de las sustancias es muy importante para nuestra seguridad ante cualquier producto químico.

El pH del agua afecta la vida terrestre y acuática. El agua de los lagos, lagunas y ríos sanos generalmente tiene un pH entre 6 y 8.

La mayoría de los peces tolera el agua con pH entre 6 y 9. Los peces más robustos y fuertes generalmente mueren en pH más bajos y más altos. Los sapos y otros anfibios son más sensibles al pH que muchos peces.

Si el pH se encuentra debajo de 5,5, el esmalte de nuestros dientes comienza a perderse haciendo daño. Si comes algún carbohidrato, como "pan" o algo que contenga azúcar, este tendrá las condiciones para hacer más daño a los dientes.

El pH de la orina suele fluctuar entre 4,6 y 8 con un promedio de 6. La orina ácida tiene tendencia a producir cristales de xantina, cistina, ácido úrico y oxalato cálcico. La orina alcalina tiene tendencia a formar cálculos de carbonato cálcico, fosfato cálcico, y fosfato de magnesio.

El pH, como la temperatura y la humedad, son importantes para la conservación de los alimentos. De ahí que generalmente disminuyendo el valor de pH de un producto, aumente el período de conservación. Por ejemplo, el tratamiento de alimentos en una atmósfera modificada con pH inferior a 4,6 puede inhibir la multiplicación de agentes patógenos.

El pH de la leche debe ser controlado desde el momento de la recolección hasta la entrega del producto, ya que es un indicador válido de sus condiciones higiénicas.

El valor normal está en torno a 6,8. Valores inferiores a pH 6,8 pueden indicar una infección en el animal, que puede ser grave si el pH es inferior a 4,4.

Ciertos colorantes orgánicos tienen un color cuando se encuentran por encima de un pH característico, y otro cuando están por debajo. Esta propiedad caracteriza a los indicadores de pH en forma de tiras de papel absorbente, en las cuales se impregna el colorante.

Existen en el mercado papeles preparados especialmente que contienen diversos colorantes indicadores. El color que adquieren cuando se sumergen en la solución de prueba se compara con una gama de colores y pH que aparece en el envase del producto. Con estos papeles, se determinan fácil y rápidamente valores de pH que se encuentran dentro de ciertos intervalos. Como se muestra en la figura 2.14.



Figura 2.14. La figura muestra la forma de medir el pH
Fuente: (bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia (2012)).

Estos medidores de pH permiten mediciones rápidas, con una exactitud de hasta una centésima de unidad de pH. El papel indicador más conocido es el papel tornasol.



Figura 2.15. Esquema de la redistribución de pH.

Fuente: (www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual.(2012))

Existe una variedad de indicadores sintéticos utilizados en el laboratorio, entre ellos están: violeta de metilo, como se muestra en la figura 2.15, rojo de metilo, anaranjado de metilo, rojo Congo, fenolftaleína, verde de metilo, azul de bromo timol, rojo neutro, verde brillante y fucsina.

Actualmente, existen aparatos sofisticados para la medición de pH, como se muestra en la figura 2.16.



Figura 2.16. Aparatos de medición de pH

Fuente: www.hannainst.com. (2012)

Hanna es un aparato que sirve para medir el pH de líquidos (agua de mar, sangre y otros).

2.5.- Orientación y inclinación del DST

2.5.1. Orientación del DST

Para optimizar la producción de agua destilada mediante el DST es necesario orientarlo hacia el norte con la cara transversal del tubo de vacío, como se muestra en la figura 2.17.

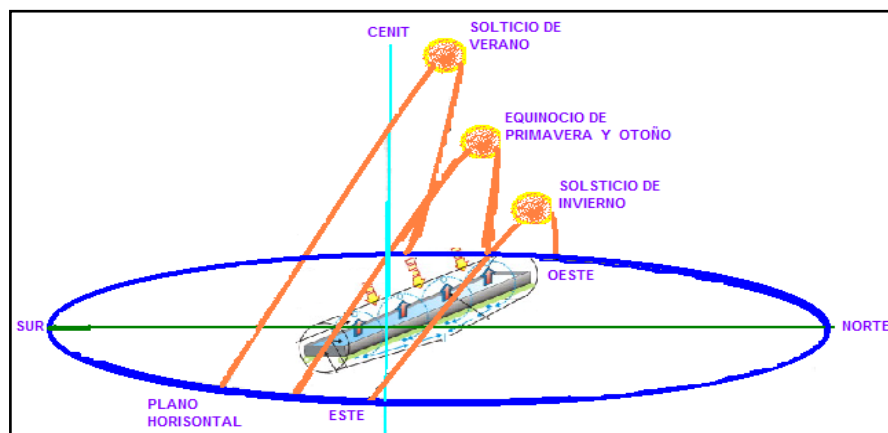


Figura 2.17.orientacion del DST
Fuente: Elaboración propia. (2012)

2.5.2. Inclinación del DST

El ángulo de inclinación del DST con respecto al plano horizontal es dos grados, como se muestra en la figura 2.18.

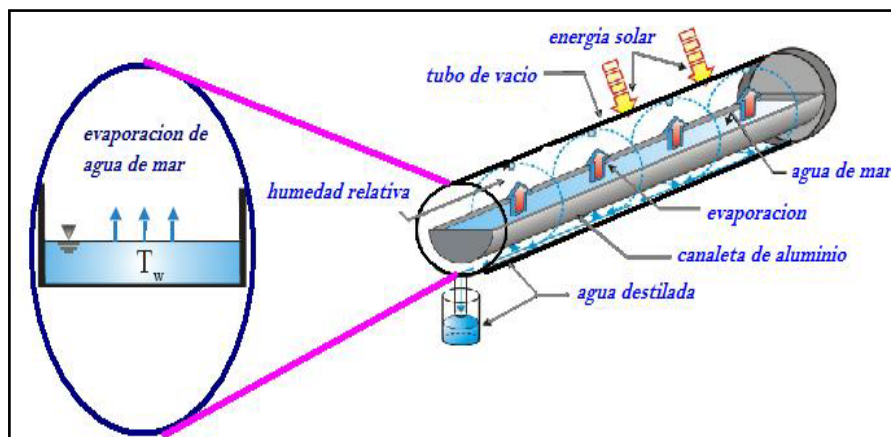


Figura 2.18. El ángulo de Inclinación del DST es dos grados con respecto al plano horizontal
Fuente: Elaboración propia. (2012)

2.6.- El principio de funcionamiento del DST.

El principio de funcionamiento del DST se ilustra en la figura 2.19. La irradiancia solar incidente a la cubierta tubular transparente es absorbida por agua de mar depositada en la canaleta negra de aluminio.

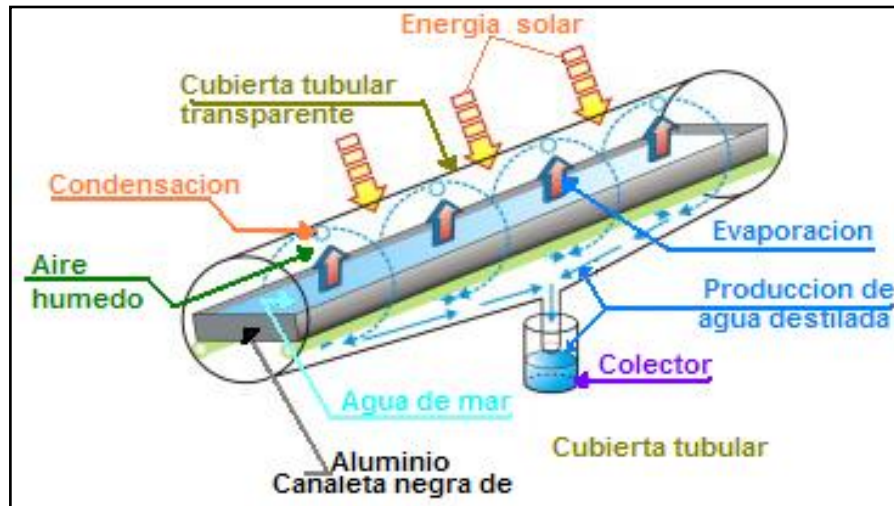


Figura 2.19. Esquema general de la transferencia de calor del DST
Fuente: Elaboración propia. (2012)

Existen tres mecanismos de transferencia de calor que ocurre en el DST, dentro y fuera de la cubierta tubular, por ejemplo.

1. Transferencia de calor por **evaporación-convección** desde el agua de mar depositada en canaleta hacia aire húmedo en el interior de DST.
2. Transferencia de calor por **convección-condensación** ocurre desde aire húmedo interno hacia la cubierta tubular interna y la otra transferencia de calor por **radiación** empieza entre el agua superficial y cubierta tubular interna.
3. Por **radiación - convección** desde la cubierta tubular hacia la atmósfera.
4. La canaleta negra de aluminio tiene una transferencia de calor por **convección** al estar en contacto por ambos lados (externo e interno) con el aire húmedo y agua de mar, en el interior del DST.

5. Luego de cierto tiempo el vapor de agua de mar es evaporado y transferido al aire húmedo y finalmente, condensado en la superficie interna de la cubierta tubular.
6. Liberando así su calor latente de vaporización; las gotas condensadas de agua destilada se escurren hacia la parte baja de la superficie interna de la cubierta tubular por la gravedad y luego se almacena en un recipiente como se muestra en la figura 2.19.

2.6.1. Transferencia de calor para el DST

Las ecuaciones de balance de masa y energía para el DST se realizan en el marco de los siguientes supuestos realizados para simplificar el análisis.

A continuación se muestra en la figura 2.20 una descripción general de transferencia de calor del DST.

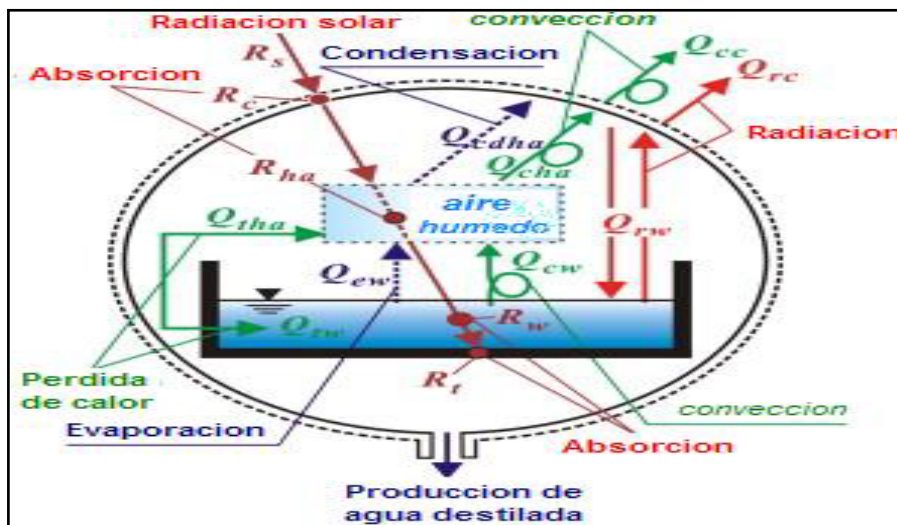


Figura 2.20. Descripción general de transferencia de calor del DST
Fuente: Elaboración propia. (2012)

La temperatura del agua de mar depositada en la canaleta negra de aluminio es uniforme y el vapor de agua cerca a la superficie de agua en la canaleta está saturado.

El destilador solar tubular está protegido herméticamente y aislado.

El coeficiente de absorción del aire húmedo es cero ($\alpha_{ha}=0$).

La ecuación de equilibrio de masa de agua en la canaleta se puede escribir como:

$$\frac{dV_w}{dt} = - \frac{m_e A_w}{\rho_w} \quad (7)$$

V_w = volumen de agua de mar depositada en la canaleta.

m_e = flujo de masa que se evapora.

A_w = superficie de agua de mar en la canaleta .

ρ_w = densidad de agua de mar.

t = tiempo.

Las ecuaciones de balances de energía para el DST se expresan en las siguientes cuatro ecuaciones descriptivas de transferencia de calor diferentes.

$$(\rho C)_w \frac{\partial(V_w T_w)}{\partial t} = R_w + Q_{tw} - Q_{ew} - Q_{cw} - Q_{rw} \quad (8)$$

$$(\rho CV)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = R_t - Q_{tw} - Q_{tha} \quad (9)$$

$$(\rho CV)_{ha} \frac{\partial T_{ha}}{\partial t} = R_{ha} + Q_{ew} + Q_{cw} + Q_{tha} - Q_{cha} - Q_{cdha} \quad (10)$$

$$(\rho CV)_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = R_c + Q_{cha} + Q_{cdha} + Q_{rw} - Q_{cc} - Q_{rc} \quad (11)$$

2.6.2. Caracterización de transferencia de calor para agua de mar en el interior del DST

En la figura 2.21 se muestra una descripción de transferencia de calor, específicamente para el agua de mar depositada en la canaleta.

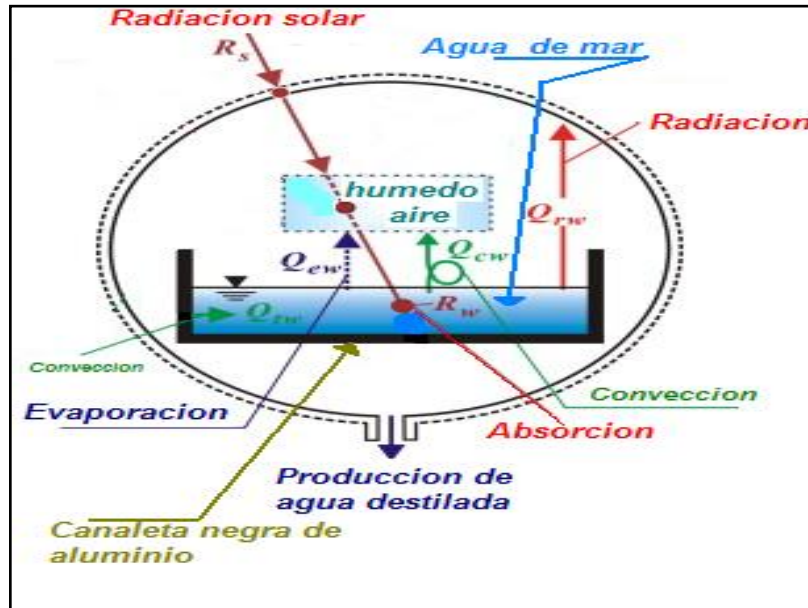


Figura 2.21. Las transferencias de calor que se dan en el agua de mar estando en estado de reposo.

Fuente: Elaboración propia. (2012)

En seguida se describe la ecuación correspondiente para este caso.

$$(\rho C)_w \frac{\partial(V_w T_w)}{\partial t} = R_w + Q_{tw} - Q_{ew} - Q_{cw} - Q_{rw} \quad (12)$$

Donde:

$$Q_{cw} = h_{cw} (T_w - T_{ha}) A_w \quad (13)$$

$$Q_{ew} = L h_{ew} (\rho_{vw} - \rho_{vha}) A_w = L h_{ew} (\beta T_w - \gamma T_{ha}) A_w \quad (14)$$

$$Q_{rw} = h_{rw} (T_w - T_{ha}) A_w \quad (15)$$

$$Q_{tw} = h_{tw} (T_t - T_w) A_{tw} \quad (16)$$

$$R_w = \tau_w R_s A_w \quad (17)$$

T_w = temperatura de agua de mar en la canaleta

T_{ha} = temperatura de aire húmedo dentro de la cubierta tubular

A_w = superficie de agua de mar en la canaleta

T_t = temperatura de la canaleta
 R_s = radiación solar
 τ_w = transmitancia de agua de mar
 Q_{cw} = transferencia de calor por convección de aire húmedo a cubierta tubular
 Q_{ew} = transferencia de calor por evaporación de la superficie de agua a aire húmedo
 Q_{rw} = transferencia de calor por radiación entre superficie de agua y la cubierta tubular
 Q_{tw} = transferencia de calor por convección entre la canaleta y el agua
 h_{cw} = coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie de agua a aire húmedo
 h_{ew} = coeficiente de transferencia de masa por evaporación de la superficie de agua a aire húmedo
 L = calor latente de vaporización
 h_{rw} = coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la superficie de agua y cubierta tubular
 h_{tw} = coeficiente de transferencia de calor por convección entre la canaleta y el agua de mar

La ecuación (12) escrita describe el calor por diferentes mecanismos transferencia; radiación (R_w), convección (Q_{tw}), y por conducción (Q_{cw}) en el interior del DST.

2.6.3. Caracterización de transferencia de calor para canaleta negra en el interior del DST.

En la caracterización de la canaleta negra se centra la descripción cuantitativa. Donde se detalla las transferencias de calor de la canaleta negra. Como se muestra en la figura 2.22, la radiación solar incidente es transmitida (88%) al DST, y otra parte restante de la radiación solar incidente es reflejada (12%) a la atmósfera.



Figura 2.22. Las transferencias de calor de la canaleta negra de aluminio.

Fuente: Elaboración propia. (2012)

Después de ser absorbida por el DST, en el interior de DST la canaleta negra de aluminio absorbe calor incidente.

Luego adquiere una temperatura considerablemente mayor a los demás componentes del DST, transferencia de calor conducción (canaleta agua de mar), se expresa estas trasferencias de calor en la siguiente ecuación general (18).

$$(\rho CV)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = R_t - Q_{tw} - Q_{tha} \quad (18)$$

$$R_t = \tau_{t1} R_s A_w + \tau_{t2} R_s (2r_t l_t - A_w) \quad (19)$$

$$Q_{tw} = h_{tw} (T_t - T_w) A_{tw} \quad (20)$$

$$Q_{tha} = h_{tha} (T_t - T_{ha}) A_{tha} \quad (21)$$

R_s = radiación solar incidente

R_t = radiación solar absorbida por la canaleta

A_w = superficie de agua de mar en la canaleta

- r_t = radio de la canaleta
- l_t = longitud de la canaleta
- τ_{t1} = transmitancia por agua de mar
- τ_{t2} = transmitancia a la canaleta
- T_t = temperatura de la canaleta
- T_{ha} = temperatura de aire húmedo
- T_w = temperatura de agua de mar depositada en la canaleta
- h_{tw} = coeficiente de transferencia de calor por conveccion entre la canaleta y el agua de mar
- h_{tha} = coeficiente de transferencia de calor por conveccion entre la canaleta y el aire húmedo
- Q_{tw} = transferencia de calor por conveccion entre la canaleta y el agua
- Q_{tha} = transferencia de calor por conveccion entre la canaleta y el aire húmedo

2.6.4. Caracterización de transferencia de calor para el aire húmedo en el interior del DST

En el interior de la cubierta tubular transparente, el aire húmedo llega a una temperatura de máximo de 70 °C, como se muestra en la siguiente figura 2.23, donde se describe la transferencia de calor para el aire húmedo, en el interior del DST.

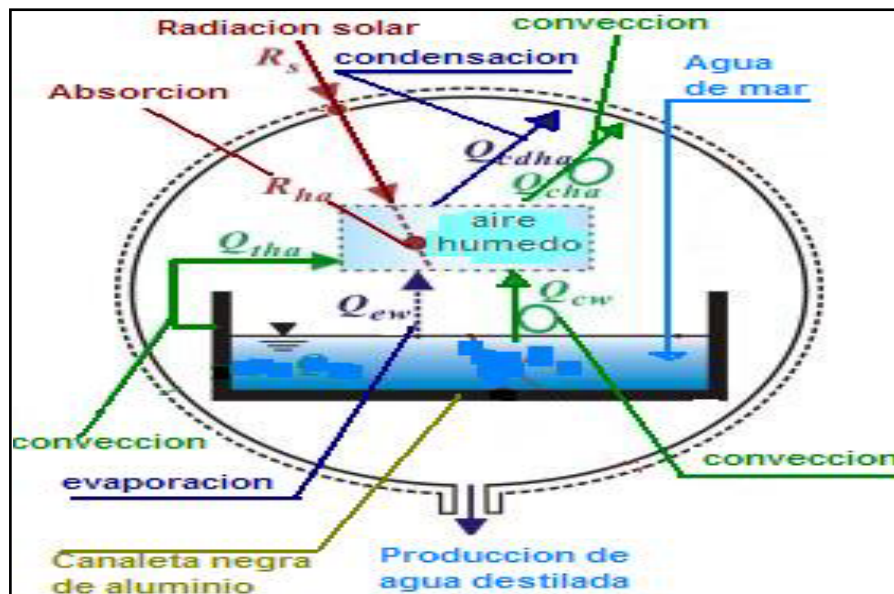


Figura 2.23. Descripción del aire húmedo dentro DST
Fuente: Elaboración propia (2012)

Y la expresión para la siguiente transferencia de calor está dada por la siguiente ecuación (22).

$$(\rho CV)_{ha} \frac{\partial T_{ha}}{\partial t} = R_{ha} + Q_{ew} + Q_{cw} + Q_{tha} - Q_{cha} - Q_{cdha} \quad (22)$$

$$R_{ha} = \tau_{ha} R_s A_{ha} \quad (23)$$

$$Q_{ew} = Lh_{ew} (\rho_{vw} - \rho_{vha}) A_w = Lh_{ew} (\beta T_w - \gamma T_{ha}) A_w \quad (24)$$

$$Q_{cw} = h_{cw} (T_w - T_{ha}) A_w \quad (25)$$

$$Q_{tha} = h_{tha} (T_t - T_{ha}) A_{tha} \quad (26)$$

$$Q_{cha} = h_{cha} (T_{tha} - T_c) A_{ha} \quad (27)$$

$$Q_{cdha} = Lh_{cdha} (\rho_{vha} - \rho_{vc}) A_{ha} = Lh_{cdha} (\gamma T_{ha} - \phi T_c) A_{ha} \quad (28)$$

R_{ha} = potencia de irradiancia transmitida al aire húmedo

Q_{ew} = transferencia de calor por evaporación de la superficie de agua a aire húmedo

Q_{cw} = transferencia de calor por convección de aire húmedo a cubierta tubular

Q_{tha} = transferencia de calor por convección entre la canaleta y el aire húmedo

Q_{cha} = transferencia de calor por convección de aire húmedo a la cubierta tubular

Q_{cdha} = transferencia de calor por condensación de la cubierta tubular a la atmósfera

τ_{ha} = transmitancia a la aire húmedo

A_{ha} = superficie de aire húmedo

R_s = radiación solar incidente

L = calor latente de vaporización

T_w = temperatura de agua de mar depositada en la canaleta

T_t = temperatura de la canaleta

T_{ha} = temperatura de aire húmedo

A_w = superficie de agua de mar en la canaleta

h_{ew} = coeficiente de transferencia de masa por evaporación de la superficie de agua a aire húmedo

h_{cw} = coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie de agua a aire húmedo

h_{tha} = coeficiente de transferencia de calor por convección entre la canaleta y el aire húmedo

h_{cdha} = coeficiente de transferencia de masa por condensación de aire húmedo a la cubierta tubular

2.6.5. Caracterización de transferencia de calor para la cubierta tubular transparente (vidrio)

La cubierta tubular transparente interna de vidrio (tubo de vacío) condensa el vapor de agua como se muestra en la figura 2.24

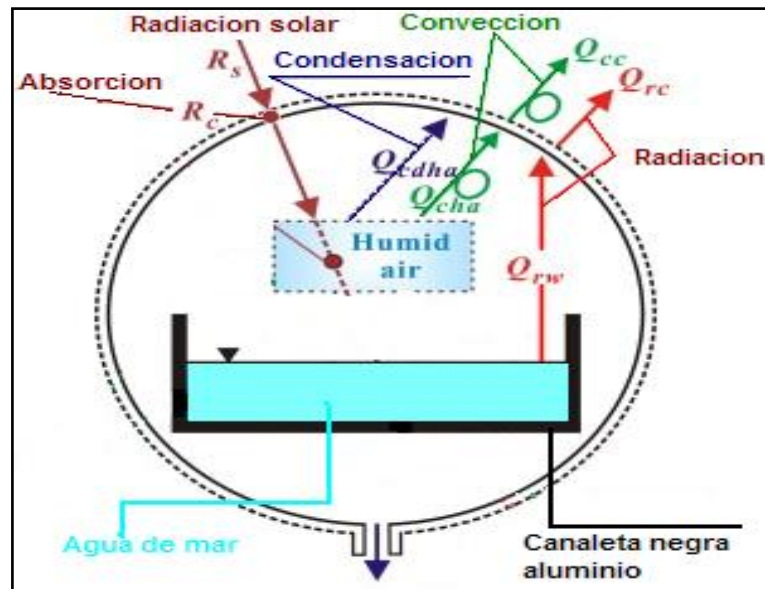


Figura 2.24. Descripción de transferencia de calor que se dan en la cubierta tubular transparente interna (tubo de vacío)
Fuente: Elaboración propia (2012)

La cubierta tubular pierde calor por los tres mecanismos de transferencia de calor.

Por radiación (Q_{rc}) y por convección (Q_{cc}). En la siguiente ecuación (29) se detalla algebraicamente los procesos de pérdida de calor.

$$(\rho CV)_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = R_c + Q_{cha} + Q_{cdha} + Q_{rw} - Q_{cc} - Q_{rc} \quad (29)$$

$$R_c = \tau_c R_s 2r_c \quad (30)$$

$$Q_{rw} = h_{rw} (T_w - T_{ha}) A_w \quad (31)$$

$$Q_{rc} = h_{rc} (T_c - T_a)A_c \quad (32)$$

$$Q_{cha} = h_{cha} (T_{tha} - T_c)A_{ha} \quad (33)$$

$$Q_{cdha} = Lh_{cdha} (\rho_{vha} - \rho_{vc})A_{ha} = Lh_{cdha} (\gamma T_{ha} - \phi T_c)A_{ha} \quad (34)$$

$$Q_{cc} = h_{cc} (T_c - T_a)A_c \quad (35)$$

R_c = irradiancia absorbida por la cubierta tubular

τ_c = transmitancia de la cubierta tubular

r_c = radio de la cubierta tubular

T_t = temperatura de la canaleta

T_{ha} = temperatura de aire húmedo

T_w = temperatura de agua de mar depositada en la canaleta

T_c = temperatura de la cubierta tubular

T_a = temperatura del medio ambiente

h_{cha} = coeficiente de transferencia de calor por convección de aire húmedo a la cubierta tubular

h_{rw} = coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la superficie de agua y cubierta tubular

h_{rc} = coeficiente de transferencia de calor por radiación de cubierta tubular a la atmósfera

A_w = superficie de agua de mar en la canaleta

A_c = superficie de la cubierta tubular

h_{cdha} = coeficiente de transferencia de masa por condensación de aire húmedo a la cubierta tubular

h_{cc} = coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta tubular a la atmósfera

$$\tau_c = (1 - al_c)\alpha_c \quad (36)$$

$$\tau_{ha} = (1 - al_c)(1 - \alpha_c)\alpha_{ha} \quad (37)$$

$$\tau_{t1} = (1 - al_c)(1 - \alpha_c)(1 - \alpha_{ha})(1 - al_w)(1 - \alpha_w)(1 - al_t)\alpha_t \quad (38)$$

$$\tau_{t2} = (1 - al_c)(1 - \alpha_c)(1 - \alpha_{ha})(1 - al_t)\alpha_t \quad (39)$$

$$\tau_w = (1 - al_c)(1 - \alpha_c)(1 - \alpha_{ha})(1 - al_w)\alpha_w \quad (40)$$

α_c = coefeciete de absorción de la cubierta tubular
 α_{ha} = coeficiente de absorción de aire húmedo
 α_w = coefeciete de absorción de agua de mar
 l_c = longitud transversal de la cubierta tubular
 l_w = longitud transversal de agua de mar en la canaleta

2.6.6. Solución aproximada para estado estacionario, aplicada al DST

Se hará algunas suposiciones para el DST. El balance de energía de la canaleta, el aire húmedo, y la cubierta tubular están en un estado de cuasi equilibrio; eso quiere decir, que el agua de mar que se tiene depositada en la canaleta, está en un estado de reposo, Entonces, los términos izquierdos de las ecuaciones 8, 9,10 se igualan a cero.

Las soluciones de las ecuaciones (8, 9 y 10) son eventualmente reescritos en términos de temperaturas de agua de mar y aire húmedo, como se muestra en las ecuaciones (41, 42,43).

$$T_{ha} = JT_w + KT_a + M \quad (41)$$

$$T_t = NT_w + PT_a + Q \quad (42)$$

$$T_c = ST_w + UT_a + V \quad (43)$$

Donde

$$H_{2-c} = (h_{rc} + h_{cc})A_c \quad (44)$$

$$H_{2-ha} = Lh_{cdha}A_{ha} \quad (45)$$

$$H_{3-ha} = h_{cha}A_{ha} \quad (46)$$

$$H_{cw-w} = h_{cw}A_w \quad (47)$$

$$H_{ew-w} = Lh_{ew}A_w \quad (48)$$

$$H_{rw-w} = h_{rw}A_w \quad (49)$$

$$H_{tha-t} = h_{tha}A_{tha} \quad (50)$$

$$H_{tw-t} = h_{tw}A_{tw} \quad (51)$$

$$B = \frac{H_{tw-t}}{H_{tha-t} + H_{tw-t}} \quad (52)$$

$$D = \frac{H_{tha-t}}{H_{tha-t} + H_{tw-t}} \quad (53)$$

$$E = \frac{R_t}{H_{tha-t} + H_{tw-t}} \quad (54)$$

$$F = \frac{-(BH_{tha-t} + \beta H_{ew-w} + H_{cw-w})}{\varphi H_{2-ha} + H_{3-ha}} \quad (55)$$

$$G = -\frac{H_{3-ha} + H_{cw-w} + \gamma(H_{2-ha} + H_{cw-w}) + (1-D)H_{tha-t}}{\varphi H_{2-ha} + H_{3-ha}} \quad (56)$$

$$I = \frac{-(R_{ha} + EH_{tha-t})}{\varphi H_{2-ha} + H_{3-ha}} \quad (57)$$

$$J = \frac{(1-F)H_{ew-w} - F(\varphi H_{2-ha} + H_{3-ha} + H_{2-c})}{(G-1)H_{3-ha} + (\varphi G - \gamma)H_{2-ha} + G(H_{2-c} + H_{rw-w})} \quad (58)$$

$$K = \frac{H_{2-c}}{(G-1)H_{3-ha} + (\varphi G - \gamma)H_{2-ha} + G(H_{2-c} + H_{rw-w})} \quad (59)$$

$$M = \frac{R_c - I(\varphi H_{2-ha} + H_{3-ha} + H_{2-c} + H_{rw-w})}{(G-1)H_{3-ha} + (\varphi G - \gamma)H_{2-ha} + G(H_{2-c} + H_{rw-w})} \quad (60)$$

$$N = B + DJ \quad (61)$$

$$P = DK \quad (62)$$

$$Q = E + DM \quad (63)$$

$$S = F + GJ \quad (64)$$

$$U = GK \quad (65)$$

$$V = I + GM \quad (66)$$

Las ecuaciones (41,42 y 43) se reemplazan en la ecuación (7), luego de operar algebraicamente se reescribire la siguiente ecuación (67).

$$(\rho C)_w \left(T_w \frac{\partial V_w}{\partial t} + V_w \frac{\partial T_w}{\partial t} \right) = XT_w + YT_a + Z \quad (67)$$

Donde:

$$X = (N - 1)H_{tw-t} + (J - 1)H_{cw-w} + (\gamma I - \beta)H_{ew-w} + (S - 1)H_{rw-w} \quad (68)$$

$$Y = PH_{tw-t} + K(H_{cw-w} + \gamma H_{ew-w}) + UH_{rw-w} \quad (69)$$

$$Z = R_w + QH_{tw-t} + M(H_{cw-w} + \gamma H_{ew-w}) + VH_{rw-w} \quad (70)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (67) se obtiene la siguiente ecuación diferencial (71).

$$\frac{dT_w}{dt} + aT_w + b \quad (71)$$

Donde:

$$a = \frac{X}{(\rho CV)_w} + \frac{m_e A_w}{(\rho V)_w} \quad (72)$$

$$b = \frac{YT_a + Z}{(\rho CV)_w} \quad (73)$$

Una solución analítica de la ecuación diferencial anterior (62) para $t=0$; $T_w = T_{w0}$ es:

$$T_w = \frac{1}{a} [(aT_{w0} + b)e^{at} - b] \quad (74)$$

El flujo de producción de agua destilada por unidad de superficie, por unidad de tiempo, se puede calcular de la siguiente manera:

$$m_p = h_{ew}(\beta T_w - \gamma T_{ha}) \quad (75)$$

El flujo de condensación por unidad de área, por unidad de tiempo, está dado en la siguiente ecuación:

$$m_c = h_{cdha}(\gamma T_{ha} - \phi T_c) \quad (76)$$

Luego, partiendo de la ecuación (9), se hace su balance de energía para la canaleta en el aire húmedo (tubo interno) con una temperatura constante, humedad relativa y se obtiene la siguiente expresión :

$$(\rho CV)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = -Q_{tw} - Q_{tha} \quad (77)$$

Una solución analítica de esta ecuación diferencial con parámetros de $t = 0; T_t = T_{t0}$: se muestra en la figura 2.25.

$$T_t = T_a + (T_{t0} - T_a) e^{-\frac{h_t A_t t}{(\rho CV)_t}} \quad (78)$$

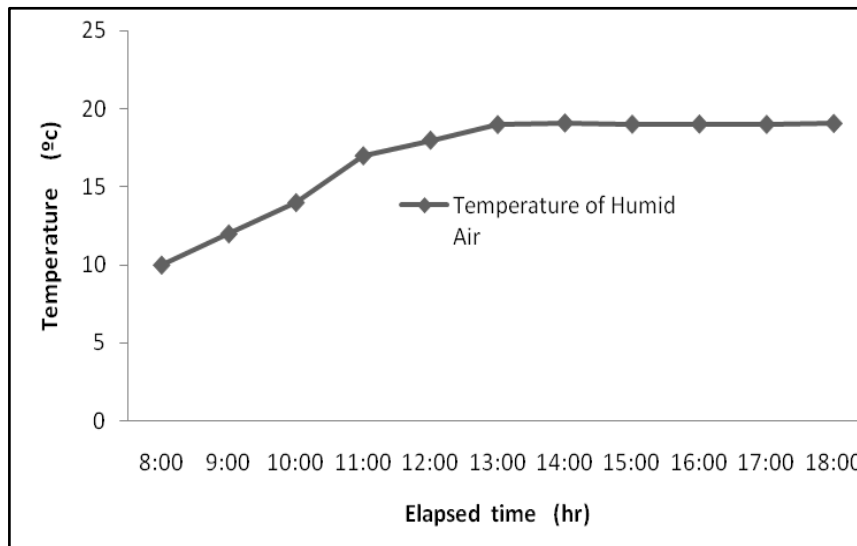


Figura 2.25. Modelo observado teóricamente de las temperaturas de DST

Fuentes: Annual Journal of Hydraulic Engineering, JCCE, Vol.49. (2005)

Tabla 2.5 valores estimados de coeficiente de transferencia de calor y masa

h_{ew} (m/s)	h_{cdha} (m/s)	h_{cw} $\left(\frac{W}{m^2 \circ C}\right)$	h_{rw} $\left(\frac{W}{m^2 \circ C}\right)$	h_{cc} $\left(\frac{W}{m^2 \circ C}\right)$	h_{rc} $\left(\frac{W}{m^2 \circ C}\right)$
0,0067	0,0023	4,43	7,59	3,89	5,69

Fuentes: Center for Experimental Aerodynamics Field Experiment Laboratory

CAPÍTULO III

MATERIALES, INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Para la caracterización del DST, se ha utilizado básicamente los siguientes materiales.

- ✓ 02 metros de madera de 1 pulg X ½ pulg.
- ✓ 04 tubos de vidrio (tubo de vacío para termas solares) de 1,5 mm de espesor.
- ✓ Pegamento de madera.
- ✓ 40 litros de agua de mar.
- ✓ Herramientas de carpintería.
- ✓ Herramientas de mecánica.
- ✓ Material auxiliar.

3.2. Instrumentos

Para la caracterización del DST se ha utilizado los siguientes instrumentos:

- ✓ 01 Piranómetro Moll – Gorchynsky marca Kipp and Zonen, de sensibilidad espectral comprendido de 0,3 a $3\mu m$, con un tiempo de respuesta de 5 segundos y una constante de calibración de $10,35 \times 10^{-3} (mV)/(Wm^2)$.
- ✓ 08 termocuplas de Cromel – Aluminel, como sensores de temperatura, ubicadas en diferentes partes del destilador solar.
- ✓ 01 higrómetro digital Vaisala HM 34.(3-95)%; ± 2
- ✓ 01 sistema de adquisición de datos marca Squirrel SQ 1200 series.

- ✓ 01 HOBO Weather Station H21-001.
- ✓ 01 cronómetro digital.

3.3. Metodología

En este contexto de metodología se realizó primero el diseño del DST. Seguidamente, es armado y montado el DST, luego es puesto en funcionamiento el DST para tratar el agua de mar, paralelamente se caracterizó las variables térmicas del DST.

3.3.1. Diseño experimental del DST

Dentro del diseño experimental se muestra en la figura 3.1, las vistas frontal y horizontal del DST. Y todas a demás vistas restantes de los componentes.

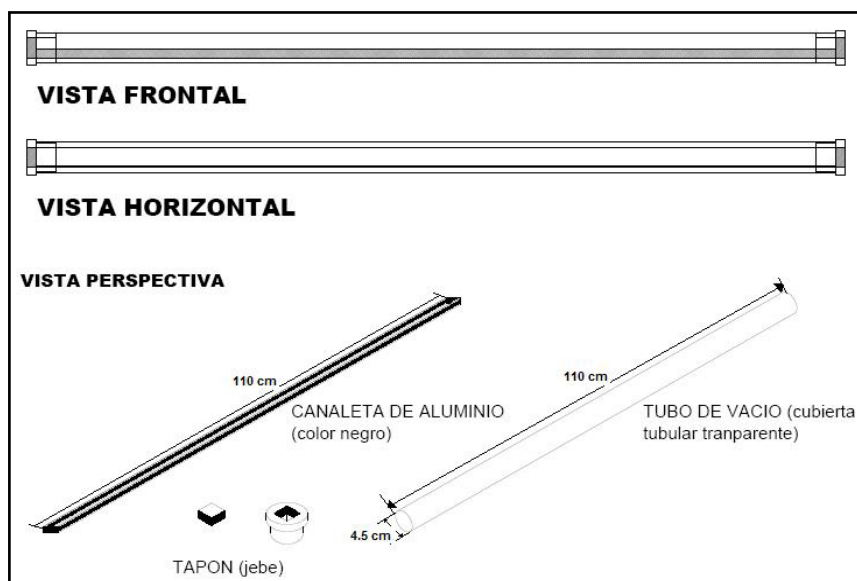


Figura 3.1. El diseño de las partes del DST.

Fuente: Elaboración propia. 2012

El diseño experimental puesto en funcionamiento se muestra en la figura 3.2, donde se muestran los equipos instalados para medir las variables y volumen de agua destilada.

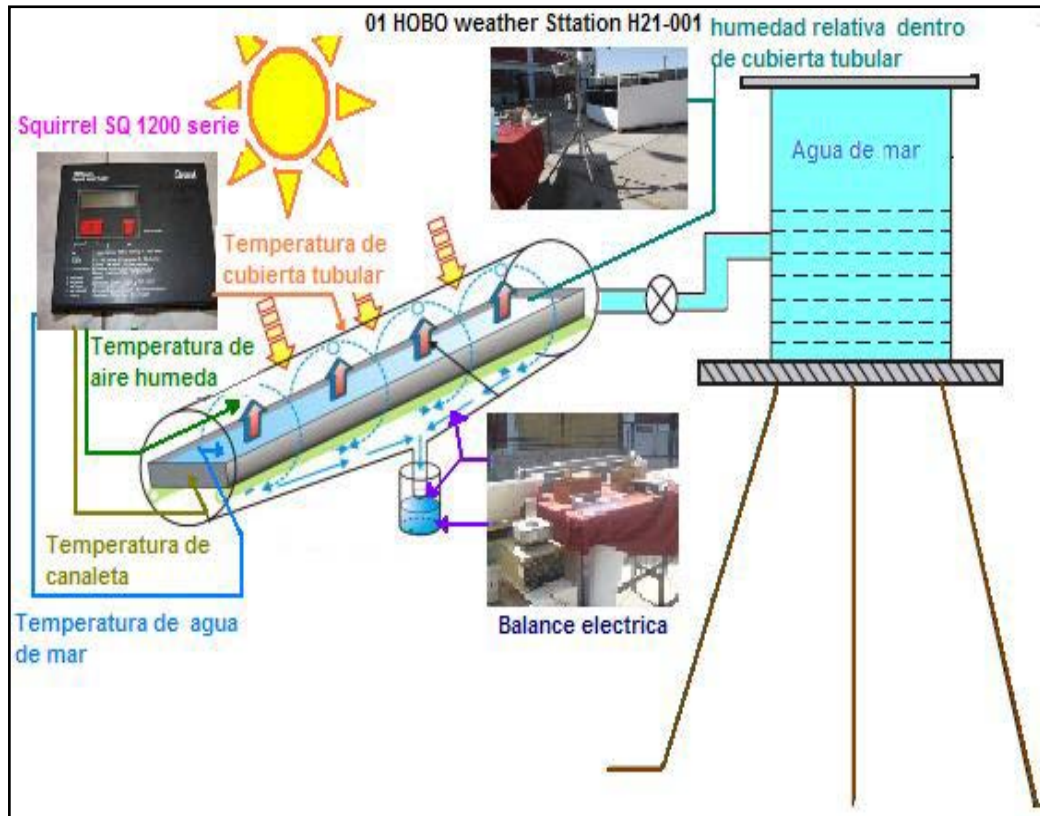


Figura 3.2. El diagrama del sistema de la evaluación del DST.
Fuente: Elaboración propia. (2012)

3.3.2. Construcción del Destilador Solar Tubular

En el proceso de construcción se empleó herramientas y materiales para la construcción del DST, en cuanto al tapón (jebe) que sirve para tapar los extremos de la cubierta tubular, en la figura 3.3 está completamente especificado.



Figura. 3.3: *Proceso de construcción del DST de agua de mar.*
Fuente: Elaboración propio. (2012)

En las Figuras siguientes (3.4 a 3.7) se muestra algunos de los trabajos realizados por el autor.

Centro de Energías Renovables de la UNJBG (CERT), donde se desarrolló toda la parte experimental de este trabajo de investigación, como se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Vista general de la evaluación del DST.
Fuente: Elaboración propia. 2012



Figura 3.5. Vista lateral de la cubierta tubular del DST.
Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 3.6: Vista desde la parte superior el Destilador Solar (DST)
Fuente: Elaboración propia. (2012)

3.3.3. Caracterización experimental del Destilador Solar Tubular

3.3.3.1. Medición de la Irradiancia solar global

La medida de la irradiancia solar se realizó colocando el solarímetro sobre el plano horizontal del DST, tal como se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Medida de la radiación solar.
Fuente: Elaboración propia. (2011)

Se midió la irradiancia solar a partir de 8 h a 17 h del día. Las lecturas registradas en el Data logger están dadas en milivoltios (mV), pero, dado que la constante de calibración del solarímetro utilizado es de $10,35 \times 10^{-3} \text{ mV/Wm}^2$, entonces para obtener las medidas que desea en W/m^2 , basta con dividir cada una de las lecturas registradas por el Data logger por esta constante.

Se ha utilizado la estación meteorológica HOBO para medir las variables de temperatura y la irradiancia solar global.



Figura 3.8. Medida de la irradiancia solar global por la estación HOBO.

Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 3.9. Balanza eléctrica que se utilizó para medir la masa de agua destilada

Fuente: Elaboración propia. (2012)

Se realizó, la medida de volumen de agua destilada, durante 4 días de la evaluación experimental, observándose que en promedio el DST destila 95 ml con un área efectiva de $0,0342\text{m}^2$ del DST.

3.3.3.2. Medición de la temperatura ambiente

Paralelamente se midió junto la temperatura ambiente de 8 h a 17 h, que se registró con la estación HOBO, tal como se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Estación HOBO.

Fuente: Elaboración propia (2012)

Para las medidas de las temperaturas del DST se utilizó el Data logger, registrando cada 10 minutos, para ello, se utilizaron termocuplas tipo K.



Figura 3.11. Data logger (squirrel) donde se almacena los datos de temperaturas

Fuente: Elaboración propia. (2012)

3.3.3.3. Medición de la humedad relativa del DST



Figura 3.12: Memoria de almacenamiento de datos meteorológicos (humedad relativa en el interior del DST, y otros parámetros más) de la estación HOBO.

Fuente: Elaboración propia. (2012)

Para la medida de la humedad relativa en el interior del DST se colocó en el interior el sensor de humedad que es conectado por un cable, donde el cable es conectado y luego es almacenado en estación HOBO, como se muestra en la figura 3.12.

3.3.3.4. Medición de la calidad de agua destilada por el DST.

Para la medida de calidad de agua



Figura 3.13 Aparato de. Medida de pH del agua destilada del DST.

Fuente: Archivo propio. (2012)



Figura 3.14. Medida de la conductividad eléctrica del agua de mar que se evaluó en el DST.

Fuente: Elaboración propia.(2012)

Para el agua destilada se tiene pH de 7,13 a una temperatura de 14,9 °C, mientras que para el agua de mar era 7,93 de pH a una temperatura de 13,1°C estos datos fueron analizados en el laboratorio de Química Analítica de la UNJBG.

En cuanto a la conductividad eléctrica, agua de mar y agua destilada, tiene los siguientes datos obtenidos:

Para el agua destilada se tiene 0,008 g sal/l, mientras que para el agua de mar es de 41,6 g de sal/l son resultados obtenidos, Es bueno aclarar que los datos obtenidos se hicieron con cálculos de conversión de tablas como se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 3.1. Factores de temperatura (f_t) para corregir datos de resistencia y conductividad en extractos de suelos, a la temperatura estándar de 25°C

°C	°F	f_t
3	37	1,709
4	39	1,660
5	41	1,613
6	42	1,569
7	44	1,528
8	46	1,488
9	48	1,488

Fuente: datos de laboratorio de HANNA. (2012)

$$CE_{25}=CE_t X f_t \quad CE_{25}=(k/R_S) X f_t$$

3.3.4. Costo de construcción del DST

Se determinó los costos de materiales de construcción, incluyendo los desperdicios, la mano de obra y el empleo de herramientas. Se anexaron los gastos operativos y de mantenimiento. El gasto operativo se cuantificó en base al sueldo diario de un obrero no especializado(S/. 50).

El costo de construcción del destilador se calculó a través de la siguiente expresión matemática:

$$C_t = C_e + C_m \quad (82)$$

Donde:

C_t = costo total (s/.);

C_e = costo de los materiales de construcción;

C_m =costo de mano de obra.

$$C_t = s/.100 + s/.50$$

$$C_t = s/. 150$$

Tabla 3.2: Costos de construcción del DST

N°	Bienes y servicios	Costo [S/.]
1	Material referencial	10,00
2	Procesamiento de datos	10,00
3	Impresión y mantenimiento de PC/Sistema	12,00
4	Construcción de destilador solar	100,00
5	Desarrollo de informe de tesis	10,00
6	Pasajes/boca de río /agua de mar	50,00
7	Total	192,00
8	Costos estimados a octubre 2012	192,00

Fuente: Archivo propio. (2012)

CAPÍTULO IV

DATOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Gráficos para el primer día de la evaluación del DST

Las mediciones abarcaron en horario de evaluación de 9:00 h a 17:00 h, durante 90 días, bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Tacna, y características del DST.

Estas mediciones corresponden a la última semana del mes de mayo. Antes de analizar estos gráficos detalladamente, se tendrá en cuenta lo siguiente.

Primero, la mejor irradiancia solar presentada en verano hasta fines del mes de Mayo, luego comienzan a descender las temperaturas del medio ambiente, así como también la irradiancia solar. Por otro lado, tomamos en cuenta la temperatura más baja presentada en los periodos del mes de Junio a Septiembre.

En la figura 4.1 se muestra el comportamiento de las temperaturas de agua de mar depositada en la canaleta negra de aluminio, donde se observó que el aire húmedo posee la más alta temperatura, llegando por encima de 50°C.

En el interior del DST, las temperaturas de la canaleta, agua de mar y aire húmedo, en función del tiempo, tienen casi el mismo comportamiento. Según se observa en la figura 4.1.

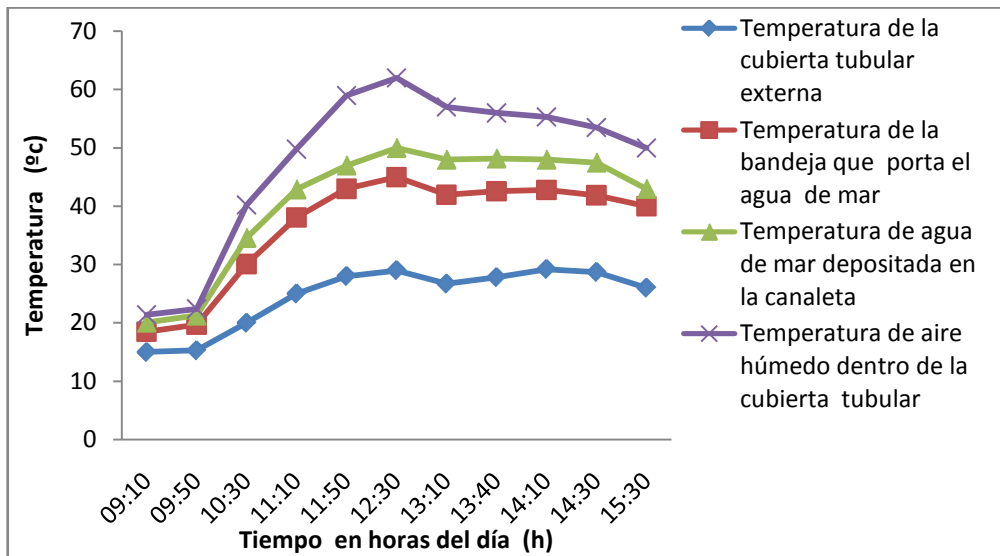


Figura 4.1. Comportamiento de la temperatura en diferentes puntos del Destilador Solar Tubular (DST).
Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 4.2 se muestra las curvas de humedad relativa interna del DST, en función de las horas del día.

Cabe aclarar, que la humedad en el interior del DST no llega al 100%; no obstante que experimentalmente solo alcanza a un 60% como máximo.

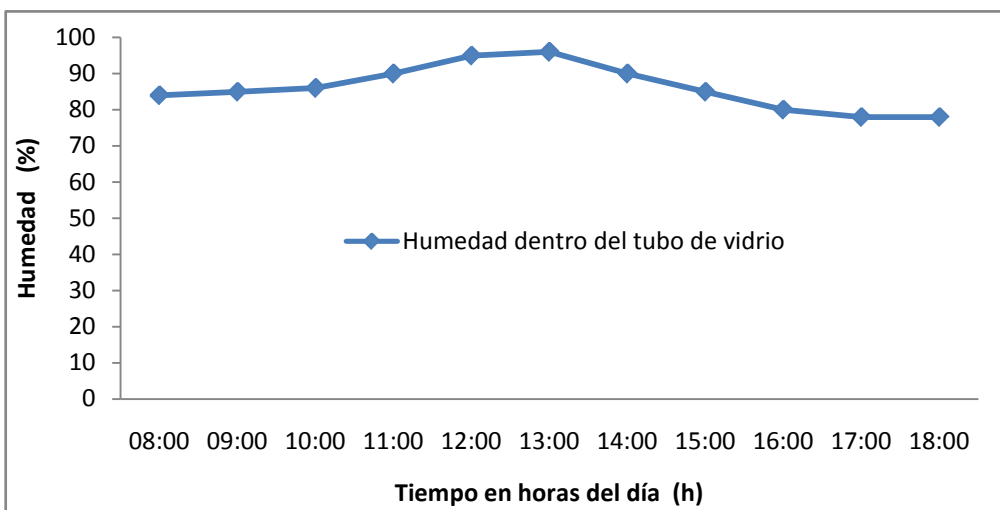


Figura 4.2. Comportamiento de humedad relativa en función de tiempo en el interior del DST.
Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 4.3 muestra el comportamiento de temperatura del ambiente con relación al tiempo.

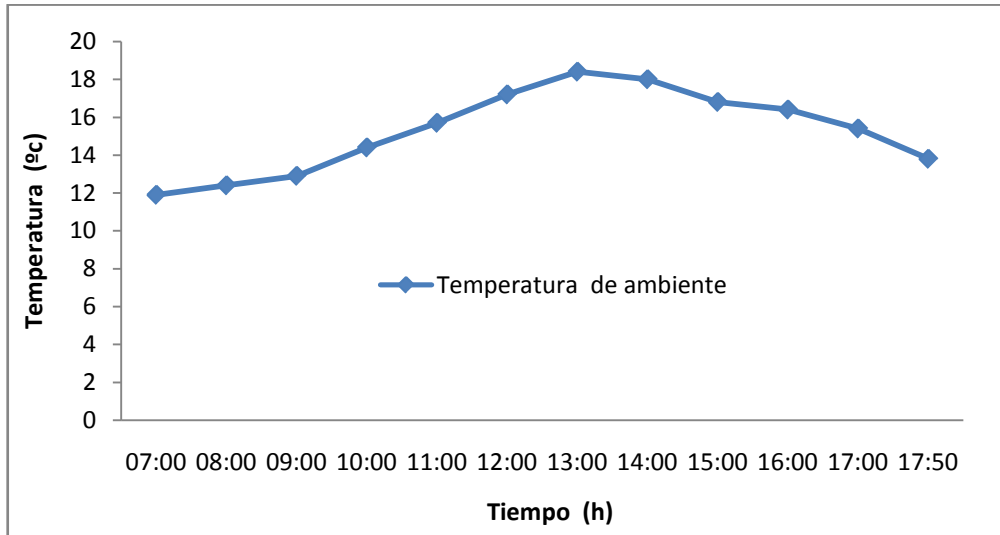


Figura 4.3. Gráfico de temperatura de ambiente en función de horas del día.

Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 4.4 se detalla la cantidad de agua destilada en un día soleado, es de 120 ml, de 9:00 h a 18:00 h, como se muestra en la figura respectiva.

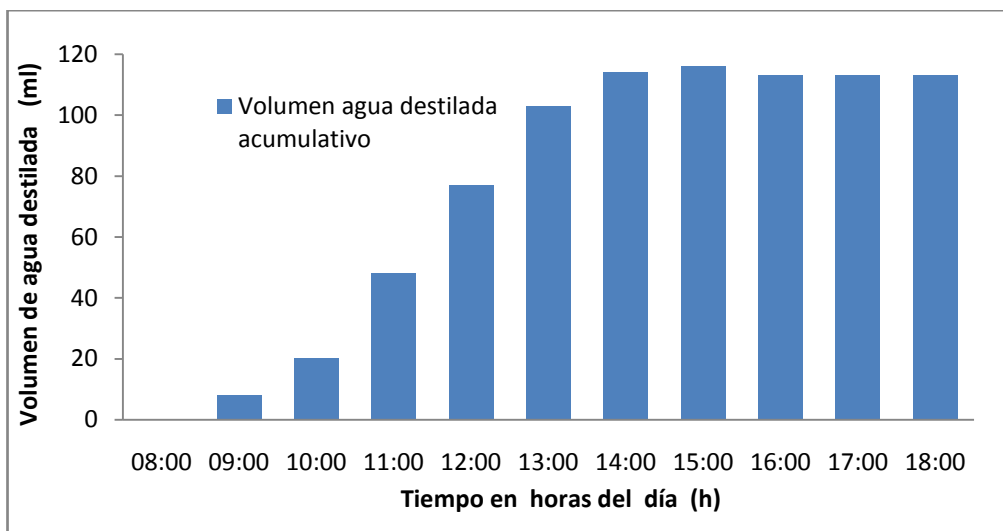


Figura 4.4, Volumen de agua destilada acumulativo del DST.

Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 4.5 se muestra la producción de agua destilada por cada hora, como se puede apreciar que la máxima producción de destilado está entre las 12 a 13 h; con una producción de 25 ml por hora; del mismo modo que la figura 4.5 muestra que, a medida que transcurre el tiempo disminuye la destilación.

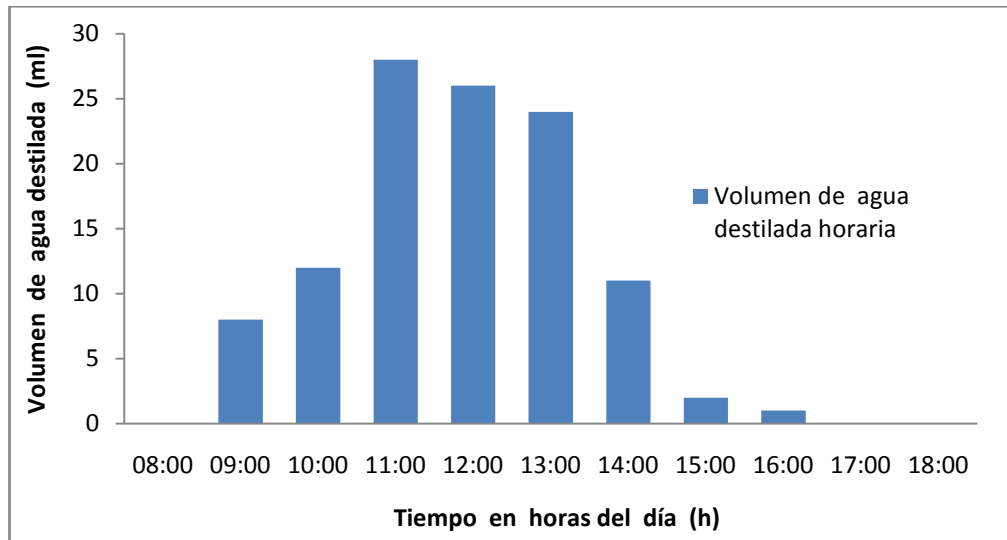


Figura 4.5. Volumen de agua destilada en cada hora del día del DST.

Fuente: Elaboración propia (2012).

La destilación o la evaporación no es continua, esto debido a que la irradiación solar no es constante, varía con el tiempo.

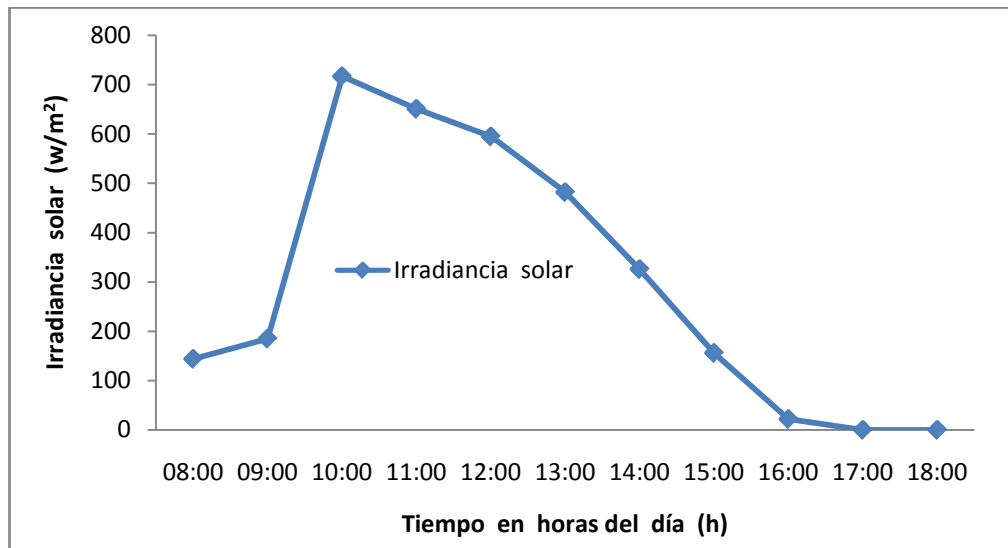


Figura 4.6. Comportamiento de la irradiancia solar en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia (2012).

4.2. Gráfico para el día de soleado de la evaluación del DST

Las figuras 4.7 a 4.12 corresponden al DST para un día soleado, donde se muestra el comportamiento de la temperatura, humedad relativa y la cantidad de agua destilada.

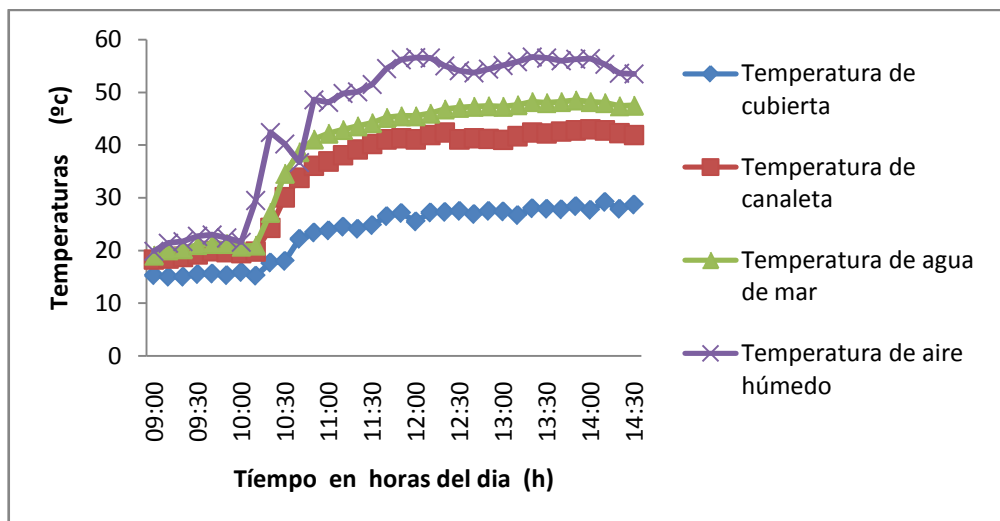


Figura 4.7. Comportamientos de las temperaturas para los días soleados del DST.

Fuente: Elaboración propia (2012).

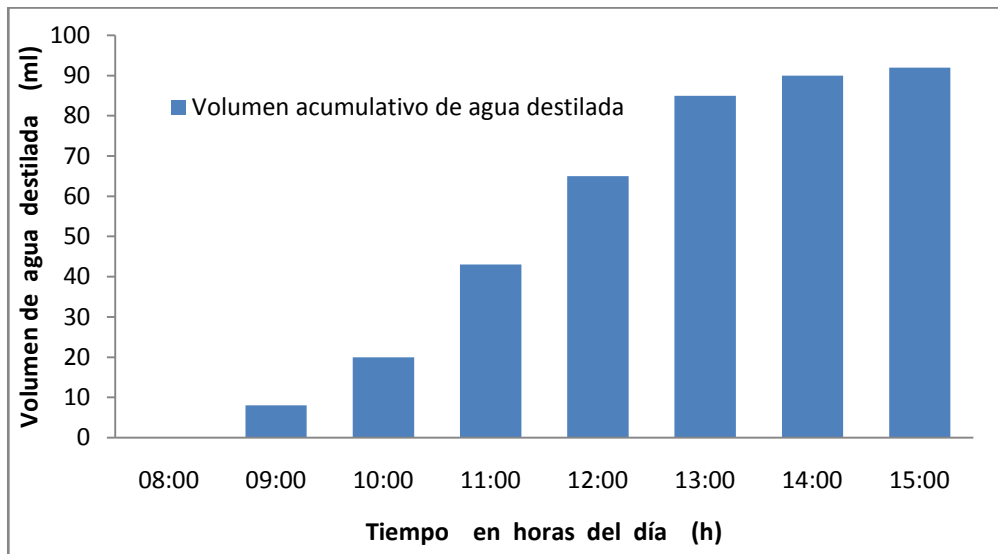


Figura 4.8. Volumen acumulado de agua destilada por el DST para días soleados.
Fuente: Elaboración propia (2012).

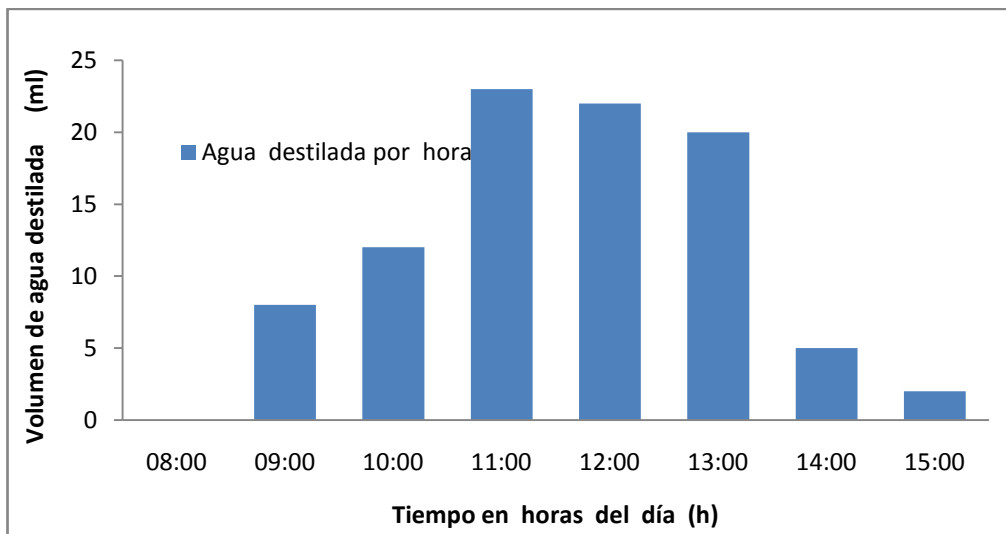


Figura 4.9. Volumen de agua destilada por el DST en cada hora del día para días soleados.
Fuente: Elaboración propia (2012).

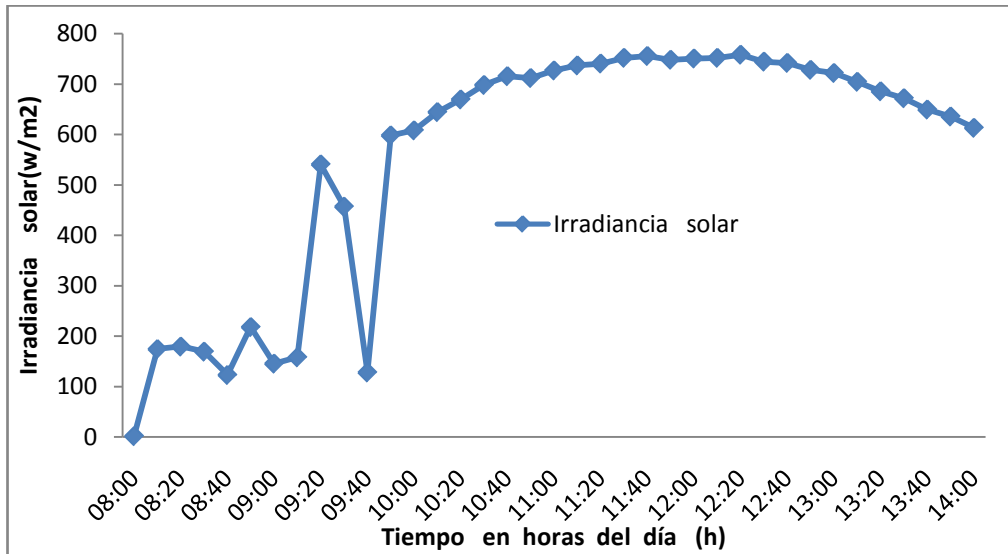


Figura 4.10. Comportamiento de la Irradiancia solar global para día soleado en función de las horas del día.
Fuente: Elaboración propia (2012).

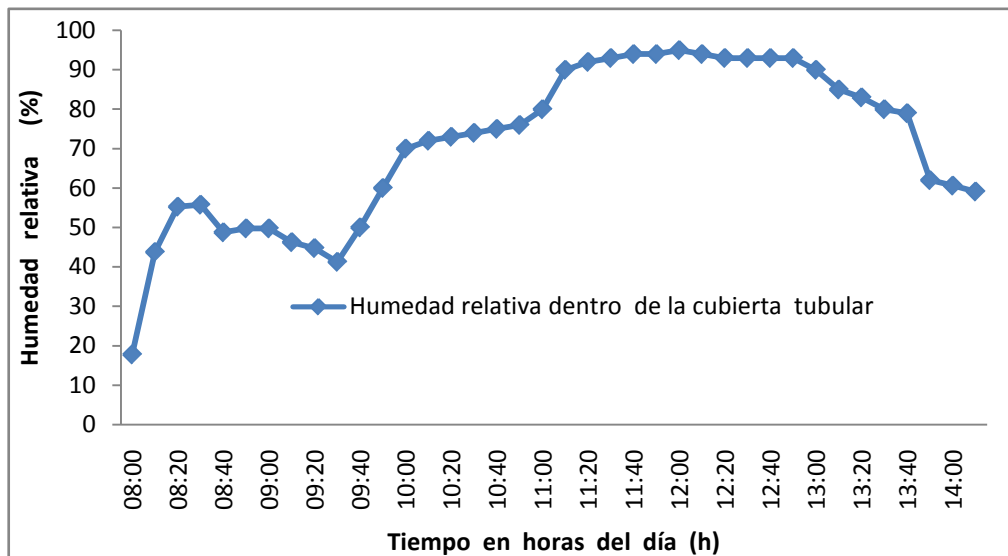


Figura 4.11. Comportamiento de la humedad relativa en el interior del DST.
Fuente: Elaboración propia. (2012)

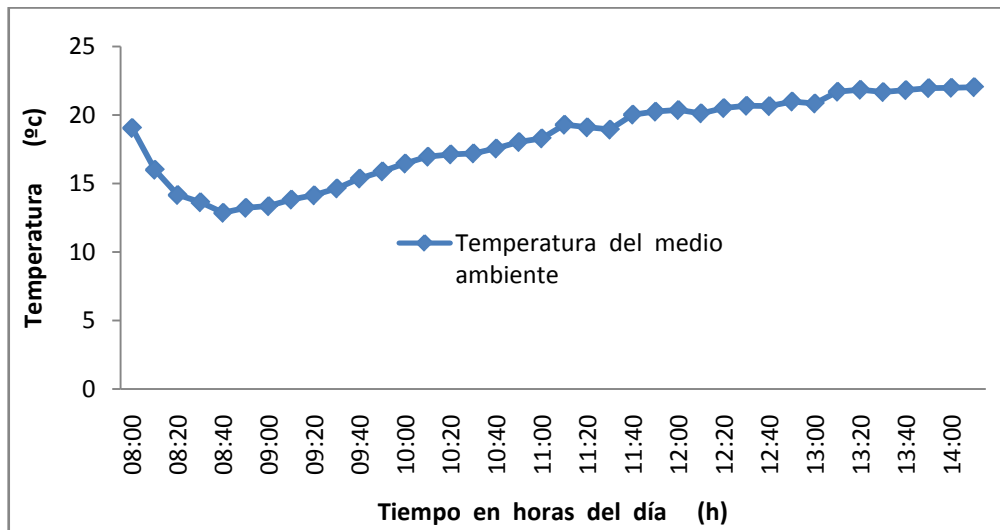


Figura 4.12. Comportamiento de la temperatura del medio ambiente (lunes 11 de junio 2012)
Fuente: Elaboración propia. (2012)

4.3. Gráfico para el día de nubosidad parcial de la evaluación del DST

Estos gráficos corresponden al 14 de julio. Día con nubosidad parcial como se detalla en las siguientes figuras.

La figura 4.13 muestra comportamiento térmico en diferentes puntos del DST, por otro lado la figura 4.14 muestra el comportamiento de temperatura del medio ambiente para el 14 de julio. Las figuras 4.15 y 4.16, muestran una descripción de la curva de la destilación, con datos acumulados por encima de 46 ml /día.

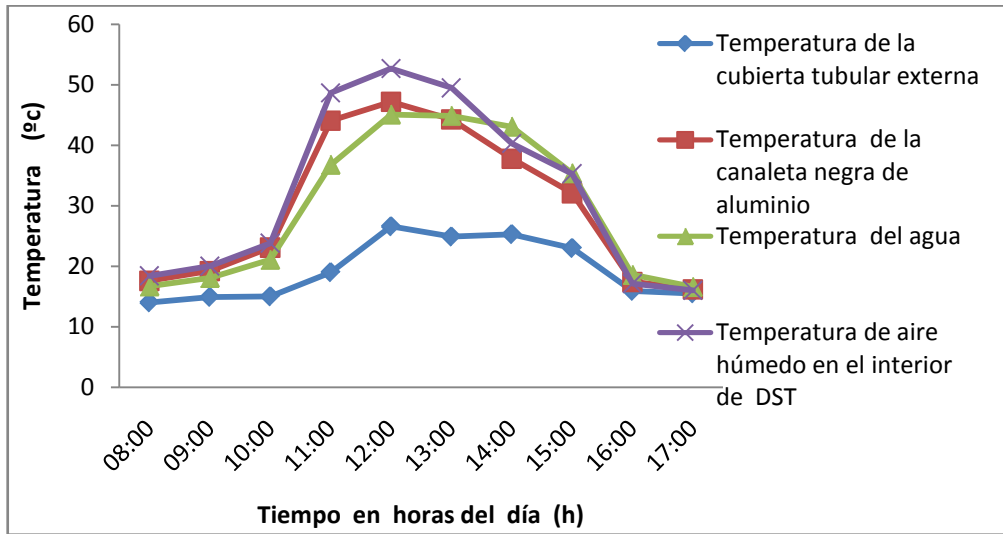


Figura 4.13. Comportamientos de las temperaturas del DST, para los días con nubosidad parcial
Fuente: Elaboración propia (2012).

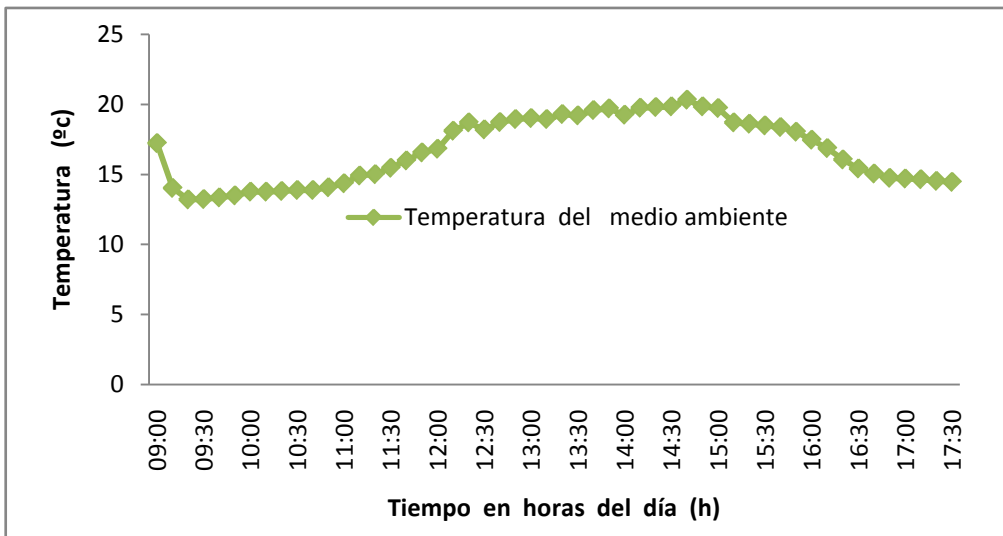


Figura 4.14. Comportamientos de la temperatura de medio ambiente para los días con nubosidad parcial o llámese nublado.
Fuente: Elaboración propia. (2012)

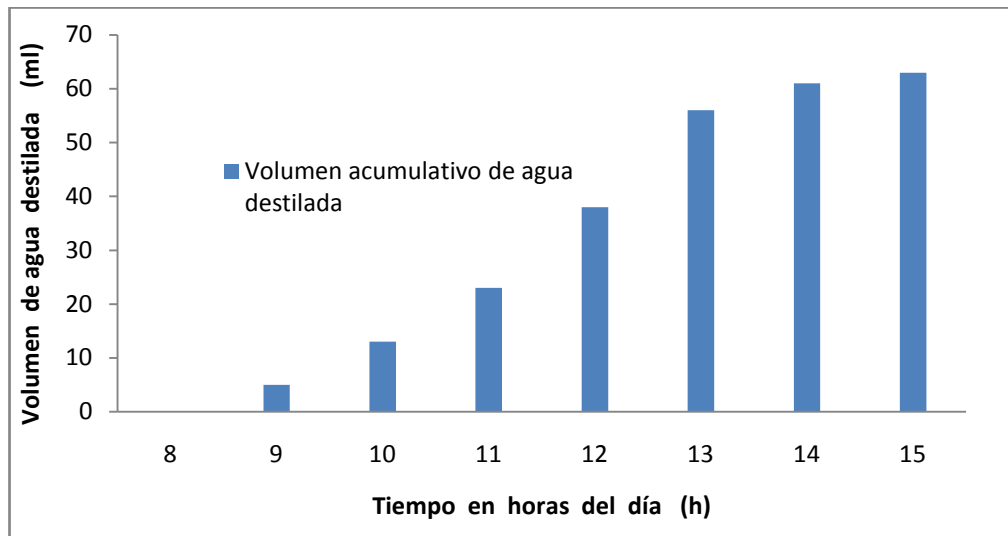


Figura 4.15. Volumen acumulado de agua destilada en un día nublado.

Fuente: Elaboración propia (2012).

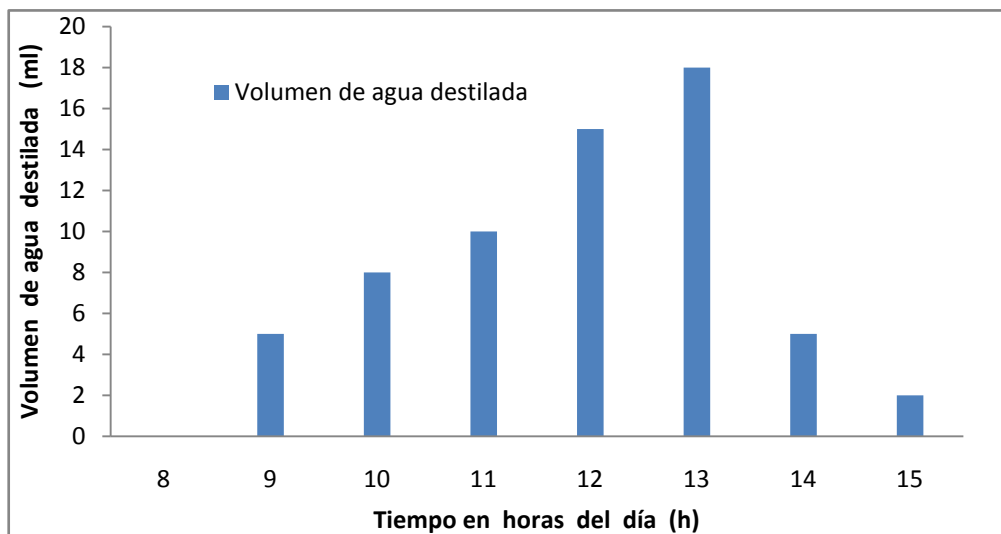


Figura 4.16. Volumen de agua destilada en cada hora para un día nublado.

Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 4.17 se observó el comportamiento de la humedad relativa en el interior del DST. Para el día mencionado (14 de julio), la humedad llega a un promedio 60%. Del mismo modo, en la figura 4.18 se observó la cantidad de incidencia de la irradiancia solar al DST.

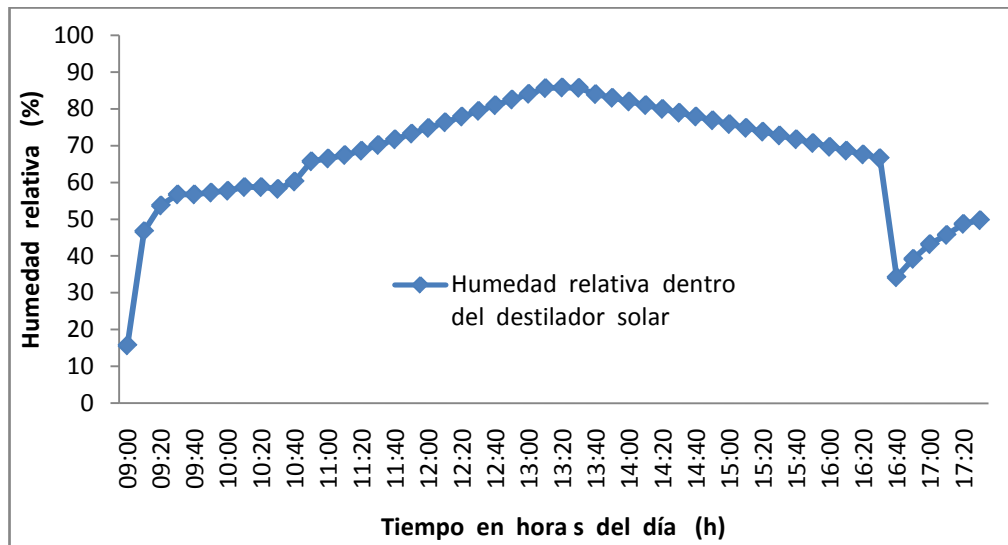


Figura 4.17 Humedad relativa dentro de DST para el día nublado.
Fuente: Elaboración propia (2012).

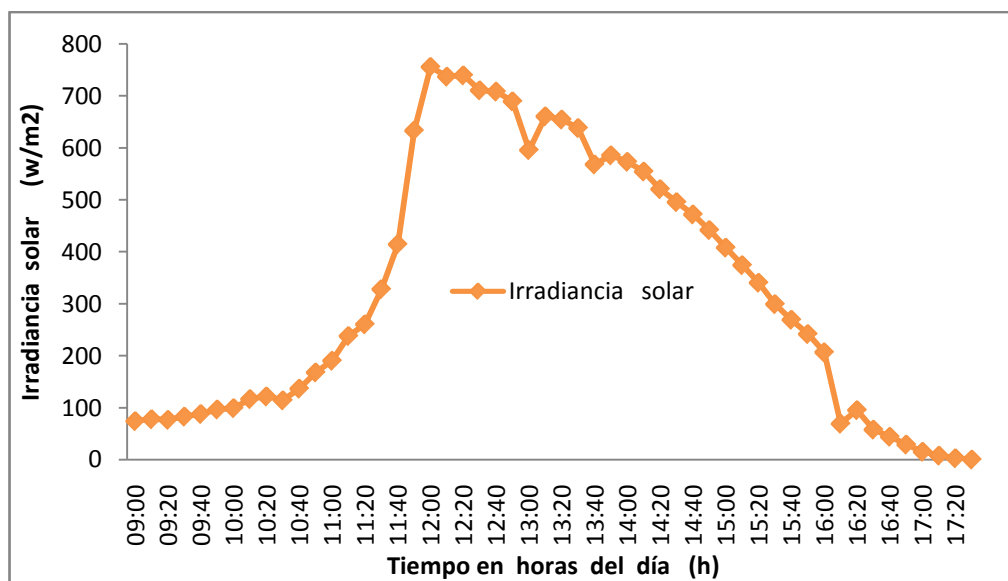


Figura 4.18 Irradiancia solar global para un día con poco sol
Fuente: Elaboración propia (2012).

4.4. Gráficos de la evaluación del DST para un día con nubosidad total

A partir de las figuras 4.19 a 4.24 se detallan las curvas de temperatura, irradiancia solar global, humedad relativa y la cantidad de agua destilada del DST.

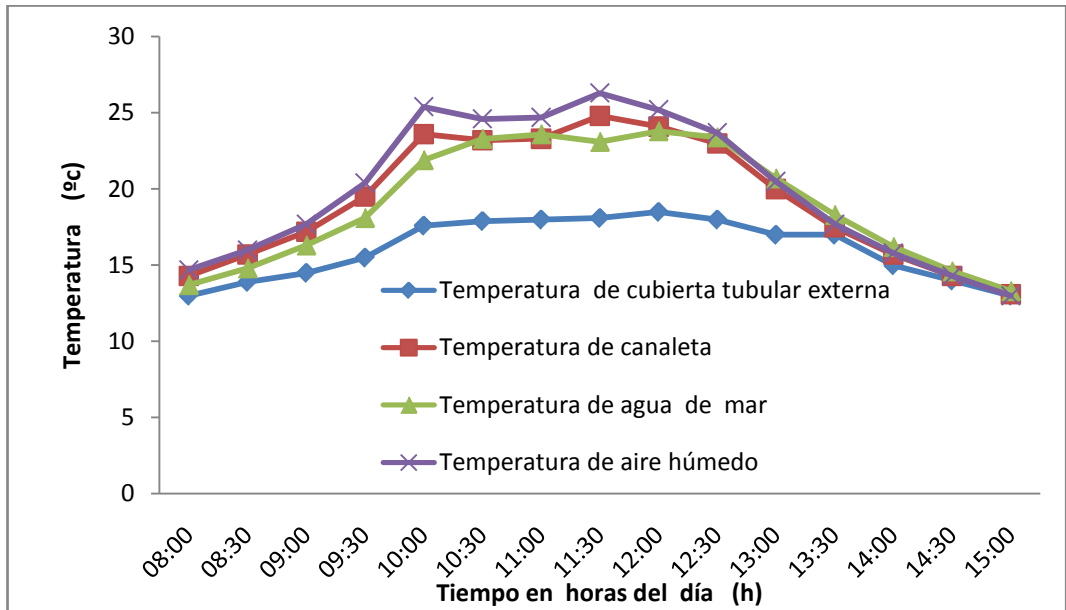


Figura 4.19. Temperaturas de las partes del DST para el día nublado (viernes 3 de agosto)

Fuente: Elaboración propia (2012).

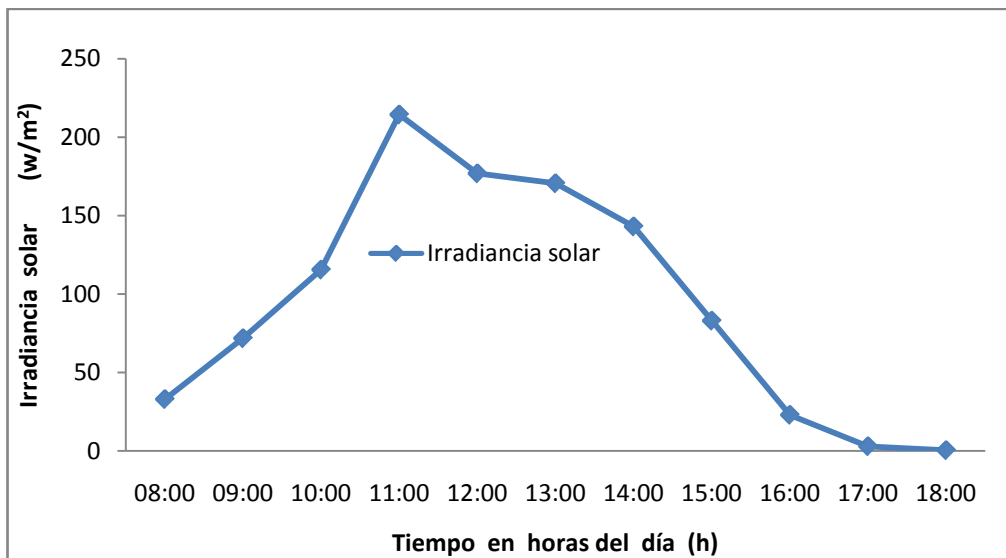


Figura 4.20. Comportamiento de la irradiancia solar global para un día nublado.

Fuente: Elaboración propia (2012).

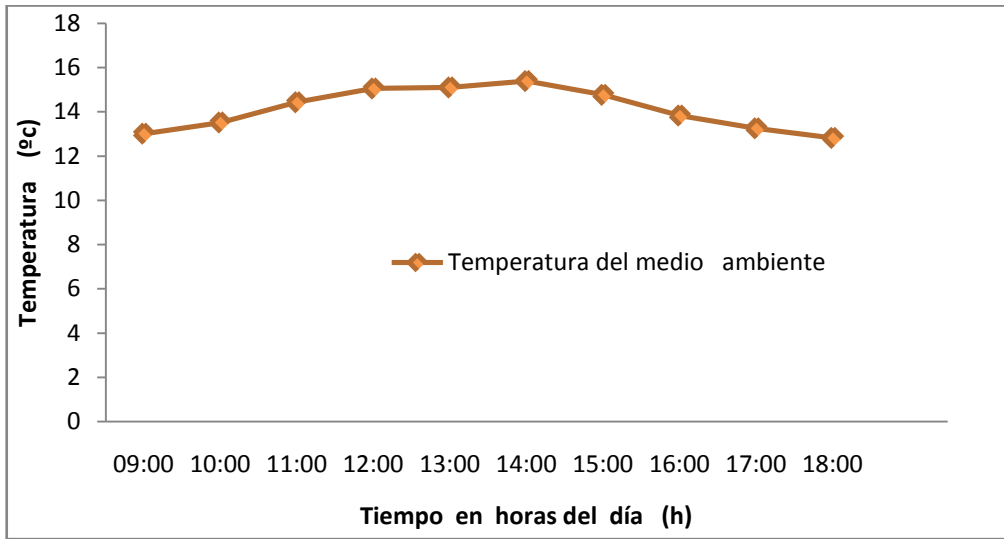


Figura 4.21. Temperatura de ambiente para un día nublado.

Fuente: Elaboración propia (2012).

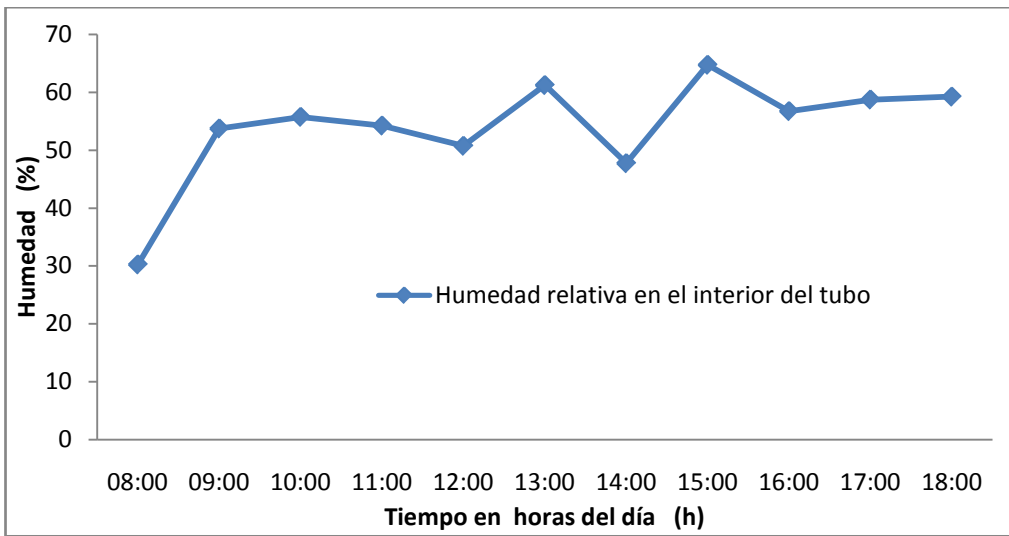


Figura 4.22. Comportamiento de la humedad relativa dentro del DST para un día nublado.

Fuente: Elaboración propia (2012).

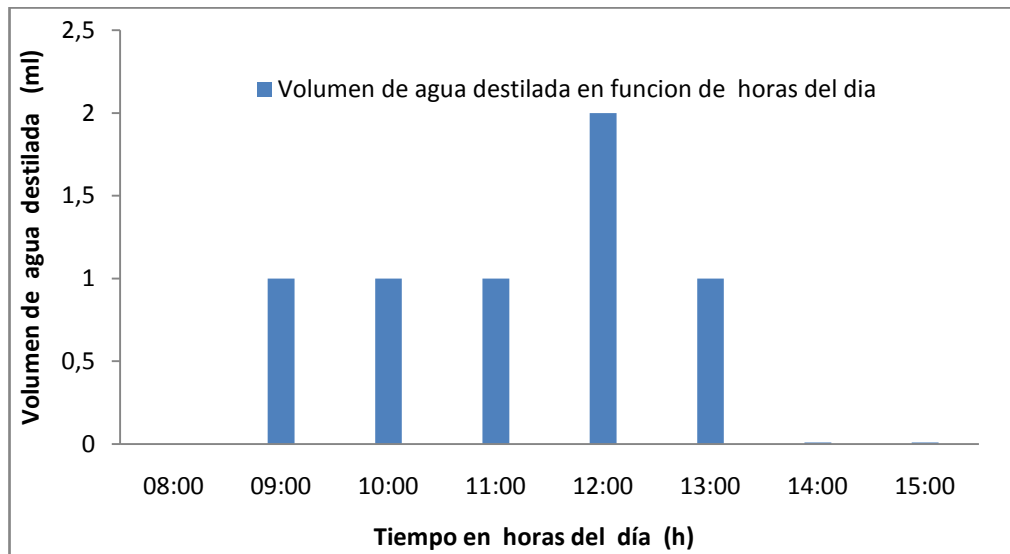


Figura 4.23. Volumen de agua destilada en cada hora del día, con mínima irradiación solar.

Fuente: Archivo propio (2012).

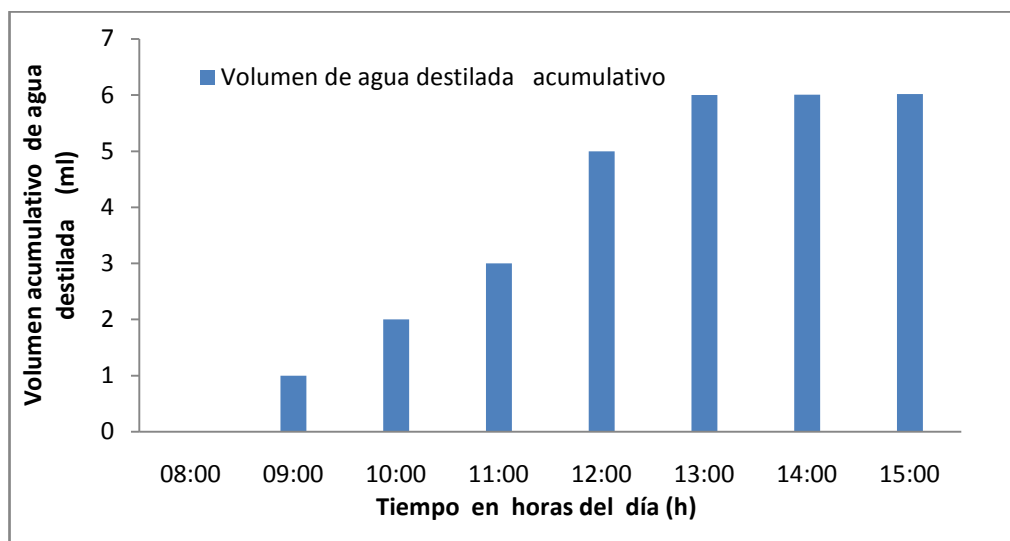


Figura 4.24. Volumen acumulativo de agua destilada para el DST durante un día nublado.

Fuente: Elaboración propia (2012).

A continuación se muestra los resultados obtenidos en cuanto a la calidad de agua obtenida antes y después de la destilación de agua de mar.

En la figura 4.25 se muestra el aparato HANNA que mide el pH de agua de mar. El agua de mar tiene la propiedad de "amortiguar" los cambios en el grado de acidez por la composición iónica que tiene en disolución, por lo que el pH del agua de mar sufre pocas oscilaciones.

Su punto neutro está en $\text{pH}=7,33$; ahora bien, el pH depende de la presión, la temperatura y ciertas sustancias modificadoras que condicionan su valor hasta llevarlo a 8,1.

Para nuestro caso, presentamos para el agua destilada 7,13 (como base) a una temperatura de $14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para el agua de mar es 7,93 (como base) a una temperatura de $13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Un pH cambiante en una corriente puede ser un indicador de la contaminación creciente o algún otro factor ambiental; pH es una medida de la acidez. El rango va de 0-14, siendo 7 neutro.

Un pH menor que 7 indica la acidez, mientras que un pH mayor que 7 indica una base.

Un pH es realmente una medida de la cantidad relativa de hidrógeno libre e iones hidroxilo en el agua.

El agua que tiene más iones de hidrógeno libre, es ácido, mientras que el agua que tiene más iones hidroxilo libre, es básico. Como el pH puede ser afectado por los productos químicos en el agua, esto es un indicador importante de que está cambiando químicamente. El pH se reporta en "unidades logarítmicas", como la escala de Richter, que mide los terremotos.

Cada número representa un cambio de 10 veces en la acidez / básico que tenía del agua. El agua con un pH de 5, es diez veces más ácido que el agua que tiene un pH de 6.

El pH del agua determina la solubilidad (cantidad que se puede disolver en el agua) y, disponibilidad biológica (cantidad que puede ser utilizado por la vida acuática) de componentes químicos, tales como nutrientes (fósforo, nitrógeno, y carbono) y metales pesados (plomo, cobre, cadmio, etc.) Por ejemplo, además de afectar a la cantidad y forma de fósforo, también afecta abundantemente en el agua; el pH también determina si la vida acuática se puede utilizar. En el caso de los metales pesados, el grado de solubilidad, determina su toxicidad. Los metales tienden a ser más tóxicos al pH más bajo, ya que son más solubles.



Figura 4.25. Aparato para medir el pH del agua destilada en el Laboratorio de química analítica de la UNJBG del DST.
Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 4.26 se muestra el aparato de medida de la salinidad o conductividad eléctrica de agua de mar.



Figura 4.26. Instrumento para la medición de la conductividad eléctrica del agua destilada para el DST.
Fuente: Elaboración propia (2012).

A escala global, la variación de la salinidad se produce por la existencia de zonas del océano en las que llueve abundantemente (como las que se encuentran en la franja del cinturón ecuatorial) y otras, en las que predomina la evaporación (como las regiones subtropicales, en las que las altas presiones atmosféricas son habituales).

En las primeras, el exceso de agua aumenta la dilución de las sales en el agua marina, por lo que se hace menos salina. Como se muestra en la figura 4.27, en las zonas de evaporación intensa sucede lo contrario: la salinidad aumenta ligeramente.

El agua más salina es más densa y, por tanto, desciende hacia profundidades mayores. De esta forma, la dilución en unas partes del océano y la evaporación y aumento de la concentración salina en otras, causa movimientos de agua entre dichas zonas.

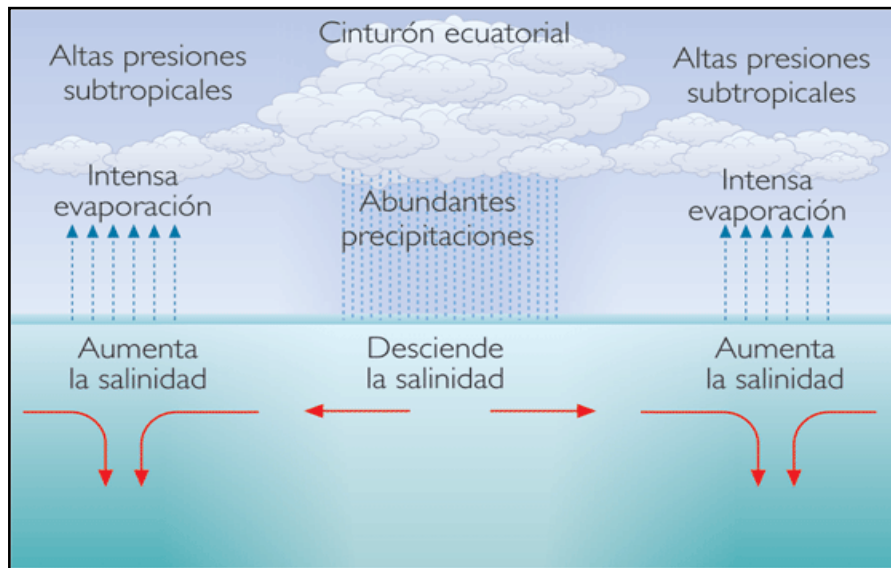


Figura 4.27. Variación de la salinidad del agua de mar.
 Fuente: Revista digital de biología de U.N.M.S.M. (2012)

En la figura 4.28 se muestra el gráfico comparativo de las curvas de la destilación para diferentes temporadas de la investigación.

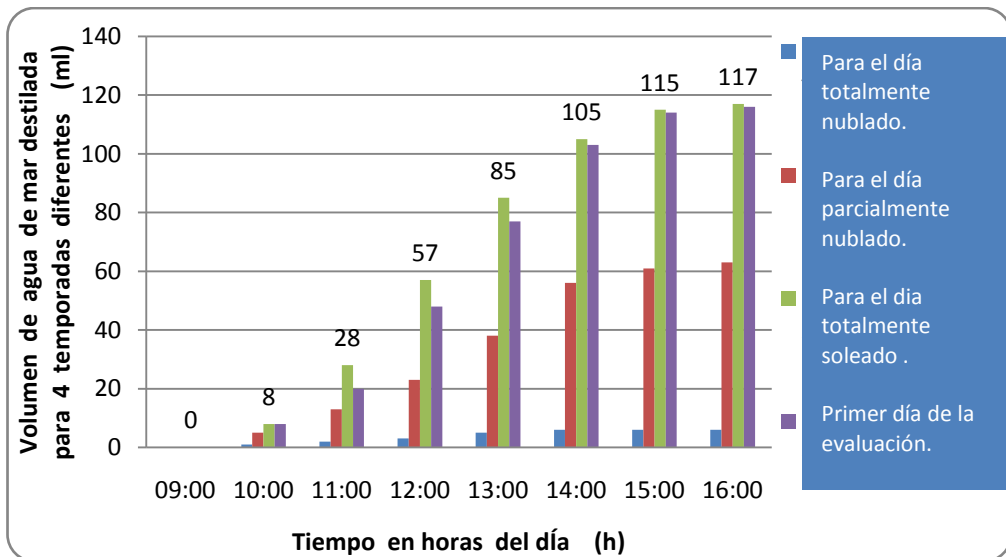


Figura 4.28. Análisis comparativo de agua destilada para cuatro procesos de evaluación en diferentes meses del año.
 Fuente: Elaboración propia (2012).

La intensidad de la energía solar, que mide sobre el destilador solar tubular, es el parámetro más importante que afecta la producción de agua del destilador solar tubular.

La cantidad de agua destilada producida (m_p en kg/m^2 día) es la cantidad de energía utilizada en la vaporización del agua en el destilador solar (Q_e en J/m^2 día) sobre el calor latente de vaporización de agua de mar (L en J/kg). La eficiencia del destilador solar (η), es la cantidad de energía utilizada en la vaporización de agua en el destilador solar tubular; sobre la cantidad de energía solar incidente en el destilador solar tubular (Q_t en J/m^2 día). Esto puede ser expresado como:

Producción del Destilador Solar:

$$m_p = \frac{Q_e}{L} = h_{ew} (\beta T_w - \gamma T_{ha}) \quad (83)$$

Eficiencia del Destilador Solar Tubular:

$$\eta = \frac{Q_{\text{absorbido}}}{Q_{\text{incidente}}} = \frac{Q_e}{Q_t} \quad (84)$$

η = Eficiencia del Destilador Solar Tubular

Q_e = cantidad de calor para vaporizar el agua de mar

Q_t = cantidad de calor que llega al destilador solar tubular

Despejando las ecuaciones anteriores encontramos explícitamente la eficiencia de cantidad destilada de agua de mar para el DST:

$$\eta = \frac{m_p * L}{\Delta t * A * R_s} \quad (85)$$

Donde

m_p = cantidad de agua destilada en un día (6 Horas) en kg

L = calor latente de vaporización es $2260000 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$ en SI

Δt = horas de evaluación de 6 horas diarias en promedio

A = área eficiente del DST que es 1 m^2

$R_s =$ irradiancia solar diaria en promedio de 650 W/m^2

Vatio.hora (W.h) - unidad de energía.

1 Wh = 3600 julio

Julio (J) - unidad de energía. 1 julio = $(1\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}^2$

$$\eta = \frac{3,6 \text{ Kg} \times 2260000 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}}{6\text{h} \times 1\text{m}^2 \times 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (86)$$

$$\eta = \frac{8136000 \text{ J}}{4800 \text{ W.h}} \quad (87)$$

$$4800 \text{ vatio} \times \text{hora} = 17\,280\,000 \text{ julio}$$

$$\eta = \frac{8136000 \text{ J}}{17280000 \text{ J}} = \frac{8136}{17280} = 47,083\% \quad (88)$$

Se obtuvo la eficiencia de producción de agua destilada por unidad de área del DST,

Pero las aplicaciones de esta investigación se orientan a la ciencia médica terapéuticas, laboratorios y otros más.

En la primera destilación de agua de mar se obtuvo un pH de 7,13 a una temperatura de $14,9 \text{ }^\circ\text{C}$, con una salinidad de 0,008 (g sal)/l. Este resultado, indica que no es tan puro, se decide destilarlo por segunda vez. Obteniéndose el resultado con un pH de 6,9 a una temperatura de $15,1 \text{ }^\circ\text{C}$, con una salinidad de 0,004 (g sal)/l. Este resultado muestra que, el destilado por segunda vez, tiene menos sal, y eso viene a ser agua inyectable, que fácilmente se podría comercializar.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

a) CONCLUSIONES

- El destilador solar tubular diseñado, construido y evaluado muestra un desempeño favorable en el proceso experimental que se desarrolló para tratar agua de mar.
- En el proceso experimental se ha llegado a determinar la producción de volumen de agua destilada, obteniéndose una producción máxima de 120 ml/día para el mes de mayo, con una irradiancia solar global promedio de 423,8 W/m²; y para una producción mínima de 45 ml/día para el mes de agosto, con una irradiancia solar global promedio de 102 W/m²; y una producción media de 63 ml/día para el mes de junio, con una irradiancia solar global promedio de 305 W/m².
- El volumen adecuado para destilar en el DST, en los tiempos de otoño e invierno es de 100ml/día en promedio, con una irradiancia solar global promedio de 350 W/m².
- La calidad del agua destilada que se obtuvo en las evaluaciones se determina midiendo el pH y la salinidad. En cuanto a la salinidad, el agua de mar tenía una concentración de 41,6 (g sal)/l, una vez destilado queda con un 0,008 (gsal)/l, en una segunda evaluación se obtuvo la salinidad de 0,003g sal /l,
- Obtenida la buena calidad del agua destilada, esta puede ser usada para el consumo poblacional, como también para ciertas aplicaciones medicinales.

b) RECOMENDACIONES

- Para posteriores investigaciones se recomienda que se evalúe el DST en los periodos de primavera–verano.
- En cuanto a los materiales, se utilizó jebe para tapar los extremos de tubo; se recomienda utilizar otros materiales aislantes del calor.
- Para futuros diseños se recomienda que el agujero de salida del agua destilada se ubique en el punto medio de la longitud del tubo.
- Sobre la base de estos resultados, es conveniente que se evalué otros tipos de destiladores a efectos de comparar su eficiencia, y el volumen de agua destilada por cada metro cuadrado de colector en un día.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Amimul A, Teruyuki F** (2010) Mass and heat transfer model of a tubular solar still. *Solar Energy* 84 (pp.1147-1156)
- **Al-Shammiri y Safar**, (1999) Solar Water Distillation(pp.214-220)
- **Antonio VALERO, Javier UCHE, Luis SERRA, (2001)** la desalación como alternativa al phn(pp.342-350).
- **Dunkle,R.V**, (1961) Solar Water Distillation, University of Colorado, (pp.895-902).
- **Fuentes M, Ramírez A** (2003) Desalación del agua: Una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República Mexicana. *Agua Latino* (pp. 1-6)
- **Gaceta** (1998) *Norma Sanitaria de Calidad del Agua Potable*. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (13 de Febrero de 1.998). Caracas, Venezuela. (pp. 216-219)
- **FARIÑAS, M**, (1999) Ósmosis inversa, fundamentos tecnología aplicaciones, ed. McGraw Hill (pp.211-221).
- **Hernández M** (2003) Problemas de sostenibilidad: Cara y cruz de la desalación. *Arts.Téc. 242*: (pp.56-58.)
- **Islam, K.M.S.**,(2004) Mass transfer in Tubular Solar Still, Proc., 59th Annual Conference, JSCE, Section 7, (pp.236-240).
- **Kumar S, Tiwari GN** (1996) Performance evaluation of an active solar distillation system. *Energy* 21: (pp.805-808)
- **Monasterio, R., Hernández, P. y Saiz, J.** (1993) Compresión Mecánica de Vapor. Ed. Mc Graw Hill(pp.421-423)
- **Nagai, N., Takeuchi, M., Mesudas, S., Yamagata, J., Fukuhara, T. And Takano, Yasuhide.** (2010) Proc. of the International Desalination Association, Bahrain, (pp.54-56)
- **Nafey AS, Sharaf MA, García L** (2010) A new visual library for design and simulation of solar desalination systems (SDS). *Desalination* (pp.197-207).

- **Rahman MH, Mamtaz R, Ferdousi SA** (1997) Pilot solar desalination plants in Bangladesh. *23rd WEDC Conf. Water and Sanitation for all*. Durban, South Africa. (Pp.178-181)
- **Teruyuki F, Fumio A, Al MutadaH, Niro Y** (2003) Production mechanism and performance of tubular solar still. *IDE World Cong. on Desalinization and Water Reuse*. Bahamas. (pp. 1-6)
- **Welty J, Wicks C, Wilson R** (1999) *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*. 2a ed. Limusa - Wiley. México. (pp.513-517)
- Proyecto de modernización de la gestión de los recursos hídricos (pmgrh,2008) diagnóstico de los problemas y conflictos en la gestión del agua en la cuenca Locumba-Sama-Caplina /Tacna (pp 132-139)
- **Zhani K, Ben Bacha H** (2010) Experimental investigation of a new solar desalination proto type using the humidification dehumidification principle. *Renew. Energy* (pp.261-263).

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Revisado (<http://www.censolar.es>.)

Disponible [20 Octubre 2011]

Revisado (<http://www.inbeca.com>.)

Disponible [25 Octubre 2011]

Revisado

(<http://www.2uji.es/cyer/internatura/estudios/energias/ccsolar.html>.)

Disponible [29 Octubre 2011]

Revisado (<http://www.dsostenible.com.ar>.)

Disponible [1 Octubre 2011]

Revisado (<http://www.sodromar.com.br>.)

Disponible [8 noviembre 2011]

Revisado (<http://www.termica.webhop.info/>.)

Disponible [19 diciembre 2011]

Revisado (<http://www.termica.webhop.info/>.)

Disponible [9 de agosto 2012]

Revisado (<http://www.rayosol.es>.)

Disponible [5 de junio 2012]

Revisado (<http://www.erasolar.es>).

Disponible [5 julio 2012]

Revisado (<http://www.pavco.com.ve>.)

Disponible [2 agosto 2012]

ANEXOS

ANEXO N° 2: Figuras de DST



Figura 5.1. El tapón de jebe que lo utilizamos para el tubo del DST
Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 5.2. El tapón de jebe encajando con el tubo transparente del DST

Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 5.3. Vista desde de uno de los extremos del tubo de DST
Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 5.4. Vista frontal del tubo con su respectivo orificio donde sale el agua condensada o agua ya destilada al colector (vaso).
Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 5.5. Vista lateral completa puesta en funcionamiento del DST.

Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 5.6: Sensor de medida de la radiación solar por la estación HOBO.

Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 5.7: Midiendo el volumen de agua destilada con la balanza de laboratorio de física aplicada

Fuente: Elaboración propia. (2012)

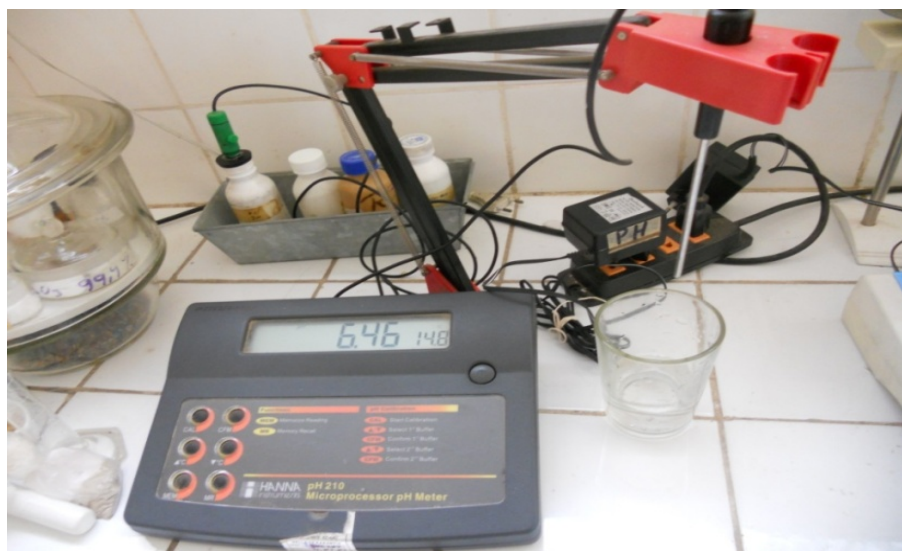


Figura 5.8. Aparato Medida el pH del agua destilada del DST.

Fuente: Elaboración propia. (2012)



Figura 5.9. Aparato de Medida de la conductividad del agua destilada del DST.

Fuente: Elaboración propia. (2012)

ANEXO N° 2: Datos medidos del DST

Tabla 5.1: Datos para el 10 de junio del DST

Fuente: Datos propio. (2012)

Tiempo (min)	Temperatura Ambiente(°c)	Humedad Relativa(%)	Irradiancia Solar(W/m ²)	Tiempo (min)	Temperatura Ambiente(°c)	Humedad Relativa(%)	Irradiancia Solar(W/m ²)
6:00	13,1	87	38	12:00	20,6	56	573
6:10	13,0	86	51	12:10	20,8	55	560
6:20	13,0	87	73	12:20	21,1	55	543
6:30	13,0	87	89	12:30	21,4	54	526
6:40	13,1	86	112	12:40	21,5	53	506
6:50	12,8	86	146	12:50	21,7	54	486
7:00	12,7	87	161	13:00	21,6	56	465
7:10	12,7	87	255	13:10	21,3	56	442
7:20	12,9	86	303	13:20	21,3	57	419
7:30	13,4	85	332	13:30	21,0	58	394
7:40	13,7	84	364	13:40	20,9	58	369
7:50	14,1	83	393	13:50	20,5	61	343
8:00	14,4	81	419	14:00	19,9	62	316
8:10	14,6	80	440	14:10	19,9	62	289
8:20	14,9	78	465	14:20	19,7	64	261
8:30	15,2	77	488	14:30	19,2	66	234
8:40	15,3	76	510	14:40	19,0	66	207
8:50	15,7	74	531	14:50	18,6	67	179
9:00	16,3	70	550	15:00	18,3	69	153
9:10	16,6	69	567	15:10	17,9	70	127
9:20	17,1	66	580	15:20	17,7	71	103
9:30	17,8	65	591	15:30	17,3	73	76
9:40	18,2	65	601	15:40	17,0	74	48
9:50	18,3	64	610	15:50	16,9	74	34
10:00	18,6	63	616	16:00	16,7	76	21
10:10	18,8	61	622	16:10	16,4	77	11
10:20	18,8	61	629	16:20	16,2	78	5
10:30	19,2	59	632	16:30	15,9	79	0
10:40	19,3	60	633	16:40	15,7	79	0
10:50	19,7	59	631	16:50	15,6	80	0
11:00	19,7	60	627	17:00	15,3	82	0
11:10	19,7	59	622	17:10	15,1	82	0
11:20	19,9	58	615	17:20	14,9	84	0
11:30	20,2	58	607	17:30	14,9	84	0
11:40	20,3	57	598	17:40	14,8	85	0
11:50	20,4	57	587	17:50	14,7	85	0

Tabla 5.2: Datos para el 28 de mayo del DST

Fuente: Datos propio. (2012)

Tiempo(h)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa(%)	Irradiancia solar(W/m ²)
8:00	13,4	84	144
9:00	13,9	85	185
10:00	15,4	86	717
11:00	16,7	90	651
12:00	18,3	95	595
13:00	18,9	96	482
14:00	19,1	90	326
15:00	18,1	85	156
16:00	16,8	80	22
17:00	15,8	78	0
18:00	14,7	78	0

Tabla 5.3: Datos para el 3 de agosto del DST

Fuente: Datos propio. (2012)

Tiempo (h)	Temperatura ambiente (*C)	Humedad relativa (%)	Irradiancia solar (W/m ²)
8:00	13,594	30,25	33,1
9:00	13,016	53,75	71,9
10:00	13,522	55,75	115,6
11:00	14,433	54,25	214,4
12:00	15,055	50,75	176,9
13:00	15,103	61,25	170,6
14:00	15,39	47,75	143,1
15:00	14,768	64,75	83,1
16:00	13,834	56,75	23,1
17:00	13,257	58,75	3,1
18:00	12,823	59,25	0,6