

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**SISTEMA DE DESTILACIÓN SOLAR PARA PURIFICACIÓN DE
AGUAS SALOBRES**

CHELVI FELIX BUSTINZA

Dr. ANTONIO BUENO LAZO

Asesor.

Tesis presentada para optar al Título de Ingeniero Químico.

Perú, Cusco, Febrero del 2020.

HOJA DE APROBACION

Presidente del Jurado

Primer Dictaminante

Segundo Dictaminante

Primer Replicante

Segundo Replicante

Asesor

Salón de Grados de la Carrera profesional de Ingeniería de Procesos.

Cusco, Febrero del. 2020.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen de Guadalupe por acompañarme siempre en todas las actividades realizadas durante el desarrollo de mi carrera.

A mis padres Edward Felix y Estanila Bustinza, por su apoyo incondicional en el desarrollo de mi vida, tanto en lo económico como en lo moral, por sus consejos y por ser la mano que me guía por el buen camino, a ustedes les debo lo que ahora soy.

A mis hermanos por estar siempre disponibles para apoyarme a tomar las mejores decisiones, por apoyarme en mis sueños.

Al Dr. Antonio Bueno y al Mgt. Wilbert Pinares, por ser mis asesores de tesis, por ser mis guías, por todo el apoyo brindado para poder concretar este trabajo, por compartir sus conocimientos de forma abierta, por su paciencia y por ser grandes amigos.

PRESENTACIÓN

**SEÑORA DECANA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS DE
LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO.**

SEÑORES DOCENTES MIEMBROS DEL JURADO.

De conformidad con las disposiciones del reglamento de Grados y Títulos que norma el desarrollo de tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Químico, presento a vuestra consideración el trabajo de tesis intitulado:

**“SISTEMA DE DESTILACIÓN SOLAR PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUAS
SALOBRES”**

El presente trabajo es una investigación experimental de la construcción y evaluación de un prototipo de destilador solar tipo batea, para la obtención de agua para consumo humano, utilizando energía solar.

En este estudio se construyó un prototipo del destilador solar aprovechando la energía solar, con el conocimiento de los parámetros físicos, químicos, biológicos y meteorológicos de la ciudad del Cusco, los cuales determinarán la eficiencia del sistema.

En todo el contenido de este trabajo de investigación, se muestra la aplicación de los principios y conceptos de la Ingeniería de los Procesos Químicos, termodinámicos y de transferencia de calor, los cuales posibilitan el desarrollo del trabajo.

El uso de energía solar (energía limpia y renovable) en el proceso de purificación de aguas salobres para consumo humano, permite disminuir los costos de operación y reducir las emisiones de gases contaminantes al ambiente, ya que la mayoría de las plantas tradicionales de destilación de aguas, emplean combustibles fósiles como energía.

TABLA DE CONTENIDO

Hoja de aprobacion	ii
Agradecimientos	iii
Presentación	iv
Nomenclatura	ix
Resumén.....	xii

CAPITULO I: GENERALIDADES

Introducción	1
Antecedentes	4
Planteamiento del problema.....	7
Pregunta de investigación	8
Preguntas de investigación específicas.	8
Objetivos	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos.	9
Justificación	10
Justificación económica	11

CAPITULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.- El agua	12
2.2.- Importancia del agua pura	12
2.3.- Agua salobre	13
2.4.- Salinidad	13
2.4.1.- Desalinización.....	14
2.5.- Diferencias entre agua dulce, agua de mar y salmuera.....	14
2.6.- Parámetros fisicoquímicos del agua para consumo humano	15
2.6.1.- pH.	15
2.6.2.- Dureza.....	16
2.6.3.- Alcalinidad.....	17
2.7.- Situación de las energías convencionales	19
2.8.- Potencial de las energías renovables	21
2.9.- Relación de las energías convencionales y las energías renovables en desalación de agua.....	22
2.10.- Energía solar.....	22
2.11.- Disposición de energía solar en peru	24

2.12.- Desalinización	25
2.12.1.- Operaciones existentes de desalinización.....	26
2.12.2.- Estadísticas y costos de procesamiento en operaciones de desalación.....	29
2.12.3.- Geografía de la desalación con energía solar.....	30
2.13.-Destilación	31
2.14.- Procesos de destilación.....	32
2.14.1.- Destilación solar.	32
2.14.2.- Evaporación.	34
2.14.3.- Parámetros de los destiladores solares.....	36
2.15.4.- Descripción del proceso de destilación solar.....	37
2.15.5.-Tipos de destiladores solares.	38
2.16.6.- Destilación solar en la naturaleza.	42
2.17.- Mecanismos de transferencia de calor en destilación.....	43
2.17.1.- Transferencia de calor por conducción en destilación.....	45
2.17.2.- Transferencia de calor por convección en destilación.....	46
2.17.3.- Transferencia de calor por radiación en destilación.	48
2.18.- Radiación solar	49
2.19.- Fenómenos ópticos y térmicos en destiladores solares	51
2.19.1.- Reflectancia	53
2.19.2.- Absorbancia (α) y cuerpos negros.....	53
2.19.3.- Emisividad (ϵ).....	55
2.19.4.- Transmitancia.....	55
2.20.- Planteamiento de ecuaciones de intercambio térmico en destilación solar.....	57
2.20.1.- Cálculo de g en la superficie del vidrio.	60
2.20.2.- Cálculo de g en la superficie del agua.	60
2.20.3.- Flujo de calor por radiación desde el agua hasta la cubierta de vidrio.....	63
2.20.4.- Flujo de calor por convección desde el agua hasta la cubierta de vidrio:.....	65
2.20.5.- Flujo de calor por evaporación –condensación: q_e	66
2.20.6.- Flujo de calor por convección desde la cubierta de vidrio al aire: $q_{c,ve-a}$	67
2.20.7.- Flujo de calor por radiación desde la cubierta de vidrio al aire: $q_{r,ve-a}$	67
2.20.8.- Cantidad de calor necesario para evaporar el agua.....	67
2.20.9.- Cantidad de calor necesario para calentar el agua.	68
2.21.10.- Cantidad de calor necesario para calentar el vidrio.	68

2.20.11.- Calor necesario para calentar el vidrio y evaporar el.....	68
2.20.12.- Flujo de calor absorbido por el sistema.	68
2.20.14.-Cálculo de las mediciones experimentales en el.....	69
prototipo del destilador solar.....	69
2.20.15.- Aguas salobres de la localidad de Maras.....	70
2.20.16.- Geología general de la localidad de Maras.....	71
2.20.16.- Consumo promedio de agua potable por habitante.....	71
2.20.17.-Cantidad promedio de habitantes por vivienda.	71

CAPITULO III : MATERIALES Y METODOS

3.1. - Materiales y equipos.....	73
3.1.1.- Materiales.....	73
3.1.2.- Equipo.....	74
3.2.- Métodos.	77
3.2.1.- Especificaciones de diseño del prototipo.....	77
3.2.2.- Método para determinar el ángulo de inclinacion de la ubierta de vidrio	
3.2.3.- Altura del nivel de agua a destilar.	81
3.2.4.- Cálculo del volúmen de carga de alimentación al	81
3.2.5.- Construcción del prototipo del destilador solar.	82
3.2.6.- Funcionamiento del prototipo.....	83

CAPITULO IV : RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Determinación del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio.	86
4.2.- Prototipo del destilador solar construido.....	87
4.3.- Funcionamiento del prototipo del destilador solar	88
4.5.- Resultados del volumen de agua producida en el prototipo del destilador solar....	96
4.6.- Resultado de la evaluación de producción diaria del volúmen destilado.....	99
4.7.- Eficiencia térmica del prototipo del destilador solar.....	101
4.7.1.- Balance de energía.....	101
4.8.- Resultados de la eficiencia volumetrica de las mediciones experimentales del prototipo del destilador solar construido.	109
4.9.- Resultados del analisis fisicoquimico del agua salobre de la localidad de maras y del agua purificada obtenida.....	112
4.10-. Costo del prototipo del destilador solar.....	113
4.11.- Ventajas y desventajas.....	114

4.12.- Resultados de consumo promedio de agua por habitante.....	115
4.13.- Cálculo del área del destilador solar.....	115
Conclusiones	117
Recomendaciones.....	118
Referencias.....	119
Anexos	122

NOMENCLATURA

- A_{ag} Área de la base del destilador, m^2
- A_v Área de la cubierta de vidrio, m^2
- C_p Calor específico del agua, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
- G Radiación solar, W/m^2
- h_{cc} Coeficiente de conductividad exterior en los costados del destilador, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
- h_{fg} Calor latente del agua, J/kg
- h_v Coeficiente de convección que depende de la velocidad del viento, W/m^2
- h'_c Coeficiente de transferencia de calor por convección $W/m^2 \cdot ^\circ C$
- K Conductividad térmica, $W/m \cdot ^\circ C$
- K_l Conductividad térmica del material aislante del destilador, $W/m \cdot ^\circ K$
- L Distancia de la base a la cubierta del vidrio del destilador, m
- m_d flujo de transferencia del condensado, $kg/m^2 \cdot s$
- m_{vi} masa del vidrio
- C_{pvi} calor específico del vidrio
- $q_{c,ag-vi}$ Flujo de calor por convección desde el agua a la cubierta de vidrio, W/m^2
- $q_{c,ve-a}$ Flujo de calor por convección desde el vidrio al aire, W/m^2
- q_e Flujo de calor por evaporación-condensación del agua a la cubierta de vidrio, W/m^2
- $q_{r,ag-vi}$ Flujo de calor por radiación desde el agua a la cubierta de vidrio, W/m^2
- $q_{r,ve-a}$ Flujo de calor por radiación desde el vidrio al aire, W/m^2
- q_p Flujo de calor perdido por los costados y base del destilador, W/m^2
- q_c Flujo de calor perdido por los costados, W/m^2
- q_b Flujo de calor perdido por la base, W/m^2

- q_k Flujo de calor por conducción, W/m^2
- Q' Flujo de calor total que entra al destilador solar, W/m^2
- $Q_{Abs. Sist.}$ Calor absorbido por el sistema, W
- $Q_{abs. Int.}$ Calor absorbido por el interior del sistema
- $Q_{abs. Ext.}$ Calor absorbido por el exterior del sistema
- T_a Temperatura ambiente, $^{\circ}C$
- T_{ai} Temperatura en el medio interno del destilador, $^{\circ}C$
- T_{ag} Temperatura del agua en el del destilador, $^{\circ}C$
- T_b Temperatura en la parte externa de la base del destilador, $^{\circ}C$
- T_c Temperatura en la parte externa del costado del destilador, $^{\circ}C$
- T_{pi} Temperatura en la pared interna del destilador, $^{\circ}C$
- T_{vi} Temperatura del vidrio en el área interna, $^{\circ}C$
- T_{ve} Temperatura del vidrio en el área externa, $^{\circ}C$
- V Velocidad del viento, m/s
- L Longitud de la base del destilador, m

LETRAS GRIEGAS

α_{vi} Absortividad del vidrio

α_{n-ag} Absortividad neta del agua

α_{ag} Absortividad del agua

α_b Absortividad de la base del destilador

σ Constante de Stefan Boltzman, $W/m^2 \cdot ^\circ K$

ρ Densidad del agua, kg/m^3

$\eta_{termica}$ Eficiencia interna

η_{me} Eficiencia de mediciones experimentales

ϵ_{ag} Emisividad del agua

ϵ_{vi} Emisividad del vidrio

τ_{vi} Transmisividad del vidrio

τ_{ag} Transmisividad del agua

ν Viscosidad cinemática, m^2/s

RESUMÉN

El objetivo del presente trabajo de Tesis fue, construir y evaluar un prototipo de destilador solar que permita purificar aguas salobres para consumo humano.

Se realizaron pruebas preliminares para determinar el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio del prototipo del destilador solar. En base a estos resultados obtenidos de las pruebas preliminares, se realizó la construcción del prototipo del destilador solar, tomando en cuenta aportes bibliográficos referentes a destiladores solares y los parámetros meteorológicos de la ciudad del Cusco; seleccionando los materiales de acuerdo a sus propiedades y las especificaciones de diseño.

El área del prototipo del destilador solar estimado fue de 0.15 m^2 , construido en acero inoxidable con una cubierta de vidrio transparente de 3 mm de espesor y un ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio de 17° .

Una vez construido el prototipo del destilador solar, se realizó la evaluación de dicho equipo, utilizando aguas salobres de la localidad de Maras como alimentación al prototipo del destilador solar, se tomaron datos diarios entre las 9:00 horas y las 17:00 horas por un periodo de tiempo comprendido entre los meses de agosto y setiembre del 2010. Se realizaron mediciones de volumen, temperatura, conductividad, radiación solar, pH, cloruros, sólidos totales disueltos al agua purificada y al agua salobre. Los resultados mostraron que existe una dependencia entre la cantidad de agua purificada y las condiciones climáticas (radiación solar), obteniéndose un volumen medio de 326.88 mL/día con un máximo de 452 mL/día y un mínimo de 208 mL/día. El agua purificada obtenida por destilación solar de la salinera de Maras cumple con todos los parámetros establecidos en los estándares de calidad del agua potable, llegando a reducirse de 387 mg/L a 25 mg/L en lo referente a cloruros y de 6500 mg/L a 33 mg/L de dureza total en el agua purificada, parámetros que cumplen con las

normas de calidad de agua potable. Finalmente, en el prototipo del destilador solar se alcanzó una eficiencia térmica del 35%.

CAPITULO I: GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN

El siglo XX ha traído un desarrollo sin precedentes en la historia de la humanidad con avances impresionantes en todas las disciplinas de la ciencia y tecnología. Sin embargo, estos avances no han sido gratuitos, sino que han tenido un precio excesivo. Durante los últimos 100 años, la población humana se ha multiplicado por un factor de 4 (pasando de 1600 millones de personas a más de 6000 millones en la actualidad). Paradójicamente el consumo de agua se ha multiplicado por 9 en el mismo periodo y el consumo de energía por 16, y ello con una degradación asociada del medio ambiente y los recursos naturales, en general, muy significativo. El agua, la energía, y el el aire este último como elemento que permite la respiración, son los 3 elementos fundamentales de los que depende la existencia tanto de la vida como de la civilización (obviamente, una está ligada a la otra). Existe un claro consenso en la actualidad que el impacto que esta sobreexplotación de los recursos está teniendo sobre el frágil ecosistema del planeta nos está llevando al límite de las posibilidades de sostenibilidad (si no se ha sobrepasado ya) que este puede ofrecer. (ALARCÓN, 2010)

Es preciso cambiar este desarrollo, que claramente ha sido y está siendo, insostenible, por otro que si lo sea. En tal sentido, se debe entender desarrollo sostenible como aquel que es capaz de satisfacer nuestras necesidades sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras.

La necesidad de purificación del agua es evidente, ya que el agua dulce es un recurso escaso. Este recurso suele tenerse muy cerca en forma de agua salobre, agua turbia, aguas de

mar, etc. Sin embargo, su salinidad la hace inutilizable para diferentes aplicaciones. Se puede afirmar que la desalinización y purificación del agua con altos niveles de salinidad, representa una alternativa para solucionar problemas de escasez de agua en la tierra.

Los procesos de desalinización pueden realizarse por medio de diversas tecnologías (procesos térmicos o de membrana), sin embargo, todos los métodos requieren cantidades significativas de energía para lograr la separación de la sal del agua; esta puede ser obtenida de fuentes convencionales (petróleo, energía nuclear) y no convencionales (utilizando energía solar, geotérmica, eólica, entre otras). El uso de energías convencionales es muy costoso y perjudica al ambiente, mientras que las energías no convencionales representan una fuente amigable, inagotable y se encuentra disponible en la naturaleza siendo más económicas, por lo que la desalinización de agua salobre por medio de energía solar representa un método óptimo para suministrar agua dulce a pequeñas comunidades, especialmente aquellas que se encuentran ubicadas en áreas aisladas, y que poseen fuentes de agua salinizada (bien sea provenientes de agua superficial o agua de pozo) y donde la energía solar es moderada y en algunos lugares es abundante, como es el caso de muchas zonas rurales costeras de nuestro país, además el costo de construcción del equipo es relativamente económico y de fácil mantenimiento. (Yabroudi, 2011)

Esta investigación se centró en estudiar la eficiencia de un prototipo de destilador solar tipo batea en la desalinización de aguas salobres y se analizó su factibilidad para ser implementado en comunidades rurales. Por tanto, para los lugares donde no existe saneamiento básico u otras opciones, el uso de energía solar para la purificación de aguas salobres es el mejor camino, debido a que el uso de una fuente renovable de energía y no una fuente de energía no renovable, son mas económicas y saludables para el ambiente.

Según la pagina <https://www.watertechonline.com>, La Desalinización global se debe realizar por las necesidades siguientes:

a.- Aproximadamente el 30% de las áreas de suministro de agua están afectadas por la salinidad en todo el mundo, y la solución a este problema parece ser muy costoso.

b.- La capacidad total de producción de agua potable necesaria supera los 66,4 millones m³/día, que incluye la industria (25.8%), (municipal 63%), centrales eléctricas (5.8%), riego (1.95%), turismo (1.9%), militar (1.1%), y otros (0.7%).

Hace 19 años en el 2001, aproximadamente 13,000 plantas de desalinización estaban disponibles en más de las 100 naciones del mundo. La capacidad de producción (de agua potable) de estas plantas fue aproximadamente 14 millones de m³/día, que es <1% del consumo mundial total de agua.

c.- La desalinización del agua es una técnica útil y simple para las poblaciones de bajos ingresos.

A diciembre del 2000, la capacidad mundial instalada para purificar agua utilizando energías convencionales eran de 26 millones de m³/día, de estos, 14 millones corresponden a desalación de agua de mar y 12 millones a agua salobre. El 61 % del agua desalada lo realiza el medio Oriente. Arabia Saudita ocupa el primer lugar en la desalación de agua con el 24.4 %, seguido por los Emiratos Árabes, cinco países árabes más, Estados Unidos, Unión Soviética y España. (wangnick, 2002)

ANTECEDENTES

García (1999), en la Tesis “Diseño y Construcción de un Destilador Solar” realiza un estudio para el dimensionamiento y aprovechamiento de la energía solar en la construcción de un destilador solar, para la obtención de agua para consumo humano, evaluando la eficiencia en la que alcanza el 44%. Las dimensiones del destilador fueron de 1.10 m² de área de plancha galvanizada. Concluye que el agua obtenida está en condiciones para el consumo humano y que este proceso permite un adecuado uso de la energía solar como desinfectante.

Barrios (2000), en la tesis intitulada “Diseño, Construcción Y Evaluación de un Destilador solar: Tipo Escalera”, presenta como objetivo general Diseñar y construir un destilador solar tipo escalera para la producción de agua para consumo humano, con el fin de obtener agua de buena calidad, obteniendo una eficiencia del 50.1% con una radiación de 507 W/m², para un área de 1.80 m².

Aybar (2005), en *Departament of mechanical Engineering, Eastern Mediterranean University, Turkey*, presenta un sistema de destilación solar para agua diseñado y probado bajo condiciones ambientales al norte de Cyprus. El sistema consta de un plato absorbente, por donde desciende el agua que es alimentada por la parte superior, evaporando esta agua en el transcurso de bajada por el destilador, simultáneamente se produce agua caliente y agua para consumo humano. Las pruebas se realizaron con tres tipos de platos.

Gálvez, Roth y Schwarzer (2004), presentan el trabajo “Desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura: diseño, modelación y simulación”. Dicho trabajo de investigación consistió en diseñar, modelar y simular un desalinizador solar de múltiples efectos que trabaje a alta temperatura, el cual se orientó a satisfacer las necesidades de agua a comunidades de pescadores artesanales aisladas en el norte de Chile. En tal sentido se mezclaron aspectos científicos, tecnológicos y sociales, haciendo que la modelación considere aspectos como: un

equipo compacto, modular, de bajo costo, mantención sencilla, vida útil significativa y de alta eficiencia.

Este equipo desalinizador funcionó con una bandeja de doble fondo y cinco bandejas principales (cinco efectos), que actuaron como evaporador y condensador a la vez. La energía fue suministrada a través de un colector solar conectado a un intercambiador de calor ubicado en la bandeja de doble fondo. Se ha desarrollado un programa computacional que a través del modelo matemático, que muestra el comportamiento de funcionamiento del equipo desalinizador. Este programa fue elaborado utilizando Matlab-Simulink con el apoyo del software biblioteca Carnot que ha desarrollado el Solar-InstitutJülich de la Fachhochschule de Aachen en Alemania. Los resultados de la simulación son gráficas o bases de datos, de los diferentes comportamientos de las temperaturas, producción de condensado y/o energías involucradas. La simulación concluye con que la producción de agua desalinizada de este equipo debe superar los 20 dm³/día.

Vergara y Pavlovic (1983), demuestran la factibilidad de la producción de sales de potasio por evaporación de agua a partir de sales del salar de Atacama (Chile); si bien el trabajo está enfocado en la obtención de sales, se desarrolla un modelo matemático para la evaporación de agua en pozas.

Wilsón (1872), en la comunidad minera de Las Salinas en lo que hoy es el norte de Chile construyó la primera planta de destilación solar “convencional”. Este era un tipo de destilador con gran depósito que se usaba para proporcionar agua fresca utilizando agua salina para una población dedicada a la extracción de nitratos. La planta usaba compartimentos de madera (1.4m por 61.0m), que tenía fondo negro teñido con alumbre y tenía un rendimiento de 4.9 litros de agua destilada por m², equivalente a 2,300 litros diarios. Esta planta estuvo en operación hasta 1912.

En 1951 se construyó para la compañía salinera Anglo Lautaro, en Coya (provincia de Antofagasta, Chile), una instalación mayor, compuesta de 10 recipientes o de pilas de hormigón armado, con una superficie de 44 m². En esta instalación se evapora un promedio de 230.000 litros por día para concentrar las soluciones de salitre

Rhodes (1999), en Arizona-EE.UU, modificó el destilador solar de María Telkes. El recipiente de condensación cubierto con una placa de vidrio, muy similar a un invernáculo, fue sustituido por uno de acero inoxidable a prueba de fuego. En el recipiente de almacenamiento hay dispuesto un sistema de tubos de Neofreno. En esta instalación pueden destilarse unos nueve litros de agua por día. Esta instalación es más costosa que una con recipiente de madera, pero ofrece una mayor garantía y es mucho más económica que un equipo de destilación a gas o ha electricidad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En muchas regiones del mundo el agua es un recurso cada vez más escaso ante el incremento demográfico y las consecuentes actividades domésticas, industriales, agrícolas, ganaderas, mineras, entre otras. En el Perú, el servicio de agua y alcantarillado es todavía un serio problema; de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en el periodo de febrero 2017 a enero 2018, el 10,6% de la población total del país, no tuvo acceso a agua potable, es decir, se abastecen de agua de otras formas: camión/ cisterna (1,2%), pozo (2,0%), río/acequia/manantial (4,0%) y otros (3,3%). En el área urbana, el 5,6% de su población no tiene acceso a agua potable y consumen agua proveniente de camión cisterna (1,3% de población), de pozo (1,2%) y de río, acequia o manantial u otro (3,2%). Por otro lado, el 28,1% de las personas del área rural no tienen acceso a agua potable, de los cuales en mayor porcentaje (16,9%) acceden a agua de río, acequia o manantial, seguido de pozo (5,1%).

Esta falta de agua potable, provoca un sin fin de enfermedades que impactan de lleno en los índices de mortalidad: diarrea, intoxicaciones, hepatitis, parasitosis, entre otras. Reducir estas enfermedades con agua purificada por medio de la destilación solar, representa una alternativa para solucionar el problema de escasez de agua apta para consumo humano y un considerable ahorro de recursos para el sistema de salud, economía y ambiental.

El presente trabajo de investigación, se basó en construir un prototipo de destilador solar para purificar aguas salobres provenientes de riachuelos y manantes para consumo humano, por medio de la radiación solar, la cual es una fuente inagotable y se encuentra en la naturaleza, siendo económica y de uso sencillo, por lo que la purificación de agua salobre por medio de energía solar representa un método óptimo para proveer agua apta para consumo humano a pequeñas comunidades, especialmente aquellas que se encuentran ubicadas en áreas

aisladas, que poseen fuentes de agua salinizada y salobre donde la energía solar es moderada y en otras comunidades es abundante, como es el caso de muchas zonas costeras rurales de nuestro país, constituyendo el trabajo un aporte para el desarrollo del país y la conservación del ambiente.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible purificar aguas salobres, utilizando un prototipo de sistema de destilación solar tipo batea?

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN ESPECÍFICAS.

1. ¿Cuáles son los parámetros de diseño del prototipo del del destilador solar para la purificación de aguas salobres?
2. ¿Un prototipo de destilador solar tipo batea, purificará aguas salobres?
3. ¿Cuál es la eficiencia del prototipo de destilador solar construido?
4. ¿Cuáles son los parámetros físico- químicos del agua salobre y del agua purificada obtenida por destilación solar?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Construir un prototipo de sistema de destilador solar, para purificación de aguas salobres.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Determinar los parámetros de diseño del prototipo del destilador solar para purificar aguas salobres.
2. Construir un prototipo de destilador solar para la purificación de aguas salobres.
3. Evaluar la eficiencia del prototipo del destilador solar construido.
4. Evaluar los parámetros físico-químicos, del agua salobre y del agua purificada, obtenida por destilación solar.

JUSTIFICACIÓN

La tierra tiene aproximadamente 1397 millones de kilómetros cúbicos de agua (MMkm³), los cuales cubren aproximadamente el 70% de la superficie del planeta. De esta cantidad el 97.5 % es agua salada con una concentración que resulta inseparable para cualquier tipo de uso directo (humano, agrícola o industrial), el resto es agua dulce. Del 2.5% de agua dulce (34.7 MMkm³), el 69.6 % está congelado en los casquetes polares en forma de hielo o nieve en los polos o cumbres montañosas; El 30.1 % están en acuíferos subterráneos (10.36 MMkm³), el 0.9 % (0.32 MMkm³) se localiza en la atmósfera y sólo el 0.3 % (0.104 MMkm³) está distribuida en ríos, lagos, arroyos, acuíferos, embalses etc. (ALARCÓN, 2010)

Según estas estadísticas, la disponibilidad de agua no implica que su calidad permita su uso para consumo humano, y ha esto agregarle la contaminación natural y por el hombre, el cual representa un problema serio; sus efectos en la salud se observan a diario en la población. El problema se acentúa por la falta de tecnologías bien establecidas para la potabilización. La incidencia de la diarrea infantil y de enfermedades endémicas fatales es muy alta, por lo que la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan atacar estos problemas es sumamente importante. Por ello, la tecnología solar aplicada a la purificación de aguas salobres, es un campo de gran atención científica en los últimos años, principalmente por su potencial aplicación en el tratamiento de agua en zonas rurales, caracterizadas por su poca densidad poblacional y falta de servicios básicos (Campos, 2012).

La pérdida de calidad del agua, las graves sequías, la crisis de energía y el calentamiento global nos llaman la atención acerca de la escasez de agua. Cada día es más difícil acceder al agua potable ya sea por su uso indiscriminado o por sus altos niveles de contaminación. Es por esto que intentando dar alternativas de solución mundial y particularmente a nuestra zona, se ha desarrollado e implementado un sistema de DESTILACIÓN SOLAR DE AGUAS

SALOBRES, que consiste, en la desalación y desinfección de aguas salobres, por medio de la radiación solar, para producir agua para consumo humano, construyendo un prototipo de destilador solar de bajo costo, y efectivo en comparación con otros sistemas que excluyen los gastos de corriente eléctrica, que muchas comunidades aun no disfrutan de este servicio.

JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

La destilación de agua salobre para consumo humano, utilizando la radiación solar, es una técnica con ventajas económicas elevadas, las cuales se basan principalmente en el ahorro de electricidad, petróleo y demás combustibles fósiles.

Además nos da la posibilidad de disponer del abasto de agua purificada *in situ*, ahorrando los gastos de transporte y todos los inconvenientes inherentes a esta actividad.

Esta tecnología es sumamente promisoría debido a su bajo costo, fácil implementación y la posibilidad de usar efecto de la irradiación solar que es relativamente frecuente e intensa en el Perú, debido a su posición geográfica.

CAPITULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.- EL AGUA

El agua pura en estado líquido prácticamente no se encuentra en la naturaleza. Lo que se llama agua es en realidad una disolución de diversas sales. Cuando se bebe agua, se perciben distintos sabores que se deben a las sales disueltas en ella, de acuerdo a las sustancias disueltas se tiene los diferentes sabores. En la naturaleza encontramos el agua en los tres estados: sólido en el hielo de los polos terrestres, líquido en los ríos, fuentes y mares y gaseoso como vapor de agua en la atmósfera. De los tres estados, sólo el hielo y el vapor de agua puede considerarse que es agua químicamente pura, pero, en estado líquido, en realidad lo que se llama agua son distintas disoluciones naturales que varían, desde las aguas muy finas de manantial de montaña de 0.2 gramos de sal por litro hasta los 35 gramos del agua de mar y los más de 45 gramos de las salmueras, pasando por toda una gama de aguas salobres de concentraciones entre 3 y 25 gramos por litro (Torres, 2004)

2.2.- IMPORTANCIA DEL AGUA PURA

Solamente el oxígeno es más esencial que el agua en sostener la vida de todos los organismos vivos. Los seres humanos pueden vivir por varias semanas sin alimento, pero solo algunos días sin agua. Esto no sorprende cuando se considera que casi 3/4 partes del cuerpo humano está compuesto de agua. Porque el agua es tan esencial para el sano mantenimiento de los huesos, tejidos y músculos. Es importante que se tome agua pura y libre de contaminantes para evitar múltiples enfermedades causadas por el consumo de aguas contaminadas o no tratadas (PEREZ, 2009)

En el agua de nuestro cuerpo tienen lugar las reacciones que nos permiten estar vivos. Gracias a la elevada capacidad de evaporación del agua, se puede regular la temperatura,

mediante la transpiración o perdiéndola por las mucosas, cuando la temperatura exterior es muy elevada, es decir, contribuye a regular la temperatura corporal mediante la evaporación de agua a través de la piel. Espringer (2017) afirma:

Que el cuerpo humano requiere buena calidad de agua para beber. El suministro de agua purificada es de vital importancia, para beber debe estar libre de bacterias, organismos patógenos, y minerales que de otro modo crearían efectos fisiológicos y causarían infecciones, tales como infecciones bacterianas, virales y protozoarias en el cuerpo humano.

2.3.- AGUA SALOBRE

Se llama agua salobre al agua que tiene mayor cantidad de sal disuelta que el agua dulce, pero menos que el agua de mar. Técnicamente, se considera agua salobre la que posee entre 0,5 y 30 gramos de sal por litro de agua. El agua salobre es típica de los estuarios, también se encuentra agua salobre de origen fósil en ciertos acuíferos asociados con rocas salinas. Se puede obtener a partir de la mezcla de agua dulce y agua de mar. Pero el término de agua salobre cubre un rango de salinidad y no es una condición definida con precisión. Es característica del agua salobre que su salinidad pueda variar considerablemente a lo largo del tiempo y del lugar (Torres, 2004)

2.4.- SALINIDAD

La salinidad del agua está en función del tipo y de la cantidad de sales que contenga. Por la salinidad, el agua con alto contenido de sales se puede clasificar en agua potable, salobre, marina o salmueras. Por una parte, la salinidad del agua salobre estará en función de la geología del subsuelo (carbonatos, sulfatos, silicatos, etc.), mientras que la salinidad del agua marina está dada, en su mayoría, por cloruro de sodio (NaCl) disociado en el catión sodio (Na^+) y el anión cloruro (Cl^-) (CLAUDIO, 2018)

El estudio de la composición se simplifica por el hecho de que las proporciones de los componentes son siempre aproximadamente las mismas, aunque la concentración conjunta de todos ellos es enormemente variable. Se refiere a la concentración total de sal como salinidad, que suele expresarse en tanto por mil (ppm). Gracias a la universalidad de su composición, la salinidad suele ser estimada a partir de la medición de un solo parámetro, como la conductividad eléctrica, el índice de refracción o la concentración de uno de sus componentes, generalmente el ion cloruro (Cl^-).

La salinidad varía cuando se comparan las cuencas, las distintas latitudes o las diferentes profundidades. Favorece una salinidad más elevada la evaporación más intensa propia de las latitudes tropicales, sobre todo en la superficie, y una menor salinidad a la proximidad de la desembocadura de ríos caudalosos y las precipitaciones elevadas.

2.4.1.- DESALINIZACIÓN.

También desalación, es el proceso que consiste en eliminar el componente salino del agua. Su aplicación fundamental es la producción de agua potable a partir de agua de mar o de agua salobre que se encuentran en los continentes.

2.5.- DIFERENCIAS ENTRE AGUA DULCE, AGUA DE MAR Y SALMUERA

Desde el punto de vista físico y químico, las diferencias entre el agua dulce, el agua de mar, el agua salobre y la salmuera, están en la distinta concentración de sales de cada una, variando entre 0.5 gramos por litro en agua dulce, de 3 a 25 gramos en agua salobre, 35 a 57 gramos en el agua de mar y 69 gramos en la salmuera. A simple vista no se puede diferenciar una de otra. Son tres líquidos perfectamente transparentes, sin color ni olor, que sólo se distinguen por los sabores debido a las diferentes concentraciones de sales en cada una.

En el proceso de desalación, por cada litro de agua que se extrae del mar, se obtiene casi la mitad de agua dulce (0,45 litros) y algo más de la mitad de salmuera (0.55 litros) (Torres, 2004)

2.6.- PARÁMETROS FISICOQUIMICOS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

2.6.1.- pH.

La calidad del agua y el pH a menudo están estrechamente relacionados. El pH es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH, el valor del pH del agua apta para consumo humano es de 6.5 a 8.5 según al reglamento de la calidad de agua para consumo humano: D.S.N° 031-2010-SA / ministerio de salud. Dirección general de salud ambiental – lima: ministerio de salud; 2011.44 p.; ilus.

El pH está relacionado con la concentración de hidrogeniones en el agua. Se define el pH como:

$$pH = -\log[H^+] \quad (2.1)$$

El agua (H₂O) se encuentra disociada en protones (H⁺) e iones hidroxilo (OH⁻). El producto de la concentración de estas especies está relacionado por una constante de equilibrio K_w:

$$[H^+][OH^-] = K_w = 10^{-14} \quad (2.2)$$

El pH es un número que describe el número de iones de hidrógeno presentes en el agua. El agua pura tiene un pH de 7.0. Esto significa que el agua contiene 1 X 10⁷ moléculas de iones de hidrógeno por litro.

Si el agua tiene $\text{pH}=4$ es ligeramente ácido, mientras que $\text{pH} =2$ y más abajo, es fuertemente ácido. Las sustancias que tienen un pH mayor a 7 son consideradas soluciones alcalinas.

2.6.2.- DUREZA

La dureza total (DT) es definida como la concentración de todos los cationes divalentes metálicos no alcalinos presentes en forma de carbonatos o bicarbonatos en una solución. A la DT se le atribuye la formación de incrustaciones en recipientes, equipos y tuberías domésticas e industriales, así como la precipitación de jabones y detergentes en contacto con el agua, alterando con ello la formación de espuma. La dureza, medida en concentración de carbonato de calcio (CaCO_3), debe estar entre 100 mg/l y 200 mg/l para evitar la corrosión y la incrustación, respectivamente.

El método para la determinación de la DT se basa en la formación de complejos estables al reaccionar la sal disódica del ácido etilen-diamino-tetraacético (EDTA) principalmente con los cationes divalentes de Ca^{2+} y Mg^{2+} (Rodríguez, 2010).

2.6.2.1.- CLASES DE DUREZA.

La dureza del agua tiene una distinción compartida entre dureza temporal (de carbonatos), y dureza permanente (de no-carbonatos)

a.- Dureza temporal: También llamada de carbonatos, es la que corresponde a la dureza que proporcionan los bicarbonatos de calcio y de magnesio. La dureza temporal puede ser eliminada al hervir el agua o por la adición de cal (hidróxido de calcio).

b.- Dureza permanente: Es debida a la presencia del sulfato de calcio y magnesio y/o cloruros en el agua, que son más solubles mientras sube la temperatura. Puede ser eliminada utilizando el método SODA (Sulfato de Sodio). También es llamada "dureza de no carbonato"

c.- Dureza total: Corresponde a la totalidad de las sales de calcio y de magnesio disueltas en un agua, expresadas como carbonato cálcico.

La forma más común de medida de la dureza de las aguas es por titulación con ácido etilendiaminotetraacético o EDTA. Este agente complejante permite valorar tanto la concentración de Ca como la de Mg.

Tabla 1

Clasificación de Dureza

Clasificación	Dureza (mg CaCO ₃ /L)
Blandas	0 – 75
Moderadamente Duras	75 – 150
Duras	150 – 300
Muy Duras	> 300

Fuente: (Kyely, 1999)

2.6.3.- ALCALINIDAD.

La alcalinidad del agua se debe al contenido de sales del ácido carbónico (bicarbonatos, carbonatos) e hidróxidos, es una medida o indicación de los componentes básicos del agua. La alcalinidad de las aguas naturales suele deberse a los carbonatos y bicarbonatos de Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio y en algunos casos también se debe en pequeño grado a Boratos, Silicatos y Fosfatos. El bicarbonato es el componente que más contribuye a la alcalinidad. La importancia de la alcalinidad es significativa en los fenómenos de coagulación y ablandamiento, así como en la prevención de la corrosión. La alcalinidad da un índice de la resistencia del agua a bajar su pH cuando se le añade ácido (Avilla)

La alcalinidad se determina por titulación de la muestra con una solución valorada de un ácido fuerte como el HCl, mediante dos puntos sucesivos de equivalencia, indicados ya sea

por medios potenciométricos o por medio del cambio de color utilizando dos indicadores ácido-base adecuado.

2.6.4.- CONDUCTIVIDAD.

Se define como conductividad a la habilidad de una solución de agua de conducir electricidad. Pequeñas partículas cargadas eléctricamente, llamadas iones, puede llevar una corriente eléctrica a través de soluciones de agua. Estos iones provienen principalmente de los ácidos y sales de la solución de fuente. La conductividad es un parámetro acumulativo de la concentración de iones de una solución. Mientras más sales, ácidos o bases se encuentren disociados en una solución, más alta será su conductividad. Al ser los iones de las sales disueltas la causa de la conductividad en las aguas brutas y residuales, con ayuda de este parámetro es posible determinar tanto la concentración de sal en aguas como el grado de pureza del agua, La unidad de medición utilizada comúnmente es el microSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$). (hunt, 1993-2004)

Tabla 2.

Clasificación del Agua de Acuerdo a la CE y a los TDS.

Clasificación	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Solidos Totales Disueltos (mg/L)
Agua potable	100-2,000	50-1,000
Agua salobre	2,000-5,000	1,0-10,000
Agua marina	5,0000-45,000	10,000-100,000
Salmuera	45,000-100,000	Mayor a 100,00

Fuente: (APHA, 1995)

En soluciones acuosas la conductividad (CE) es directamente proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos (TDS), por lo tanto cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad.

Además de los conductímetros, están los instrumentos TDS que convierten automáticamente el valor de conductividad eléctrica en ppm, dando una lectura directa de la concentración de sólidos disueltos, facilitando así los resultados. La conductividad de una solución se determina por un movimiento iónico.

La temperatura afecta al movimiento iónico, por ello es necesario compensar la temperatura cuando se realizan mediciones de precisión. Generalmente, para realizar mediciones comparativas, la temperatura estándar es de 20 °C ó 25°C.

Tabla 3.

Parámetros Fisicoquímicos de Agua Potable y Límites Máximos Permisibles

Parámetros	Unidad	LMP
Alcalinidad Total	mg/L	
Dureza Total CaCO ₃	mg/L	500
Acidez Total CO ₂	mg/L	
Cloruros	Mg/L	250
Sulfatos SO ₄	Mg/L	250
Ph		6.5 – 8.5
Conductividad	μS/cm	1500
Turbiedad	NTU	5

Fuente: (Sunass, 2000)

2.7.- SITUACIÓN DE LAS ENERGÍAS CONVENCIONALES

El petróleo ha sido durante todo el siglo XX, y en la actualidad, nuestra principal fuente de suministro energético, sin exagerar el afirmar que todo el modelo de vida “occidental” gira en

torno a este elemento. Basta con considerar que todo el proceso de extracción, transporte y transformación del petróleo constituye la primera actividad mundial en términos económicos. La segunda es la industria automotriz, estrechamente relacionada con la anterior. La dependencia del petróleo de nuestra sociedad queda patente con el siguiente dato: según la Agencia Internacional de la Energía en 1880 la producción mundial, localizada casi por completo en Estados Unidos, era inferior al millón de toneladas. Hasta el 2006, la producción supera los 3.500 millones de toneladas.

Es evidente que nos encontramos ante una crisis más del petróleo, sino ante el fin de una era dominada por las tecnologías basadas en el uso del mismo. En el mundo cada día se consume energía equivalente a 210 millones de barriles de petróleo. El 75% de estas necesidades energéticas se cubren con la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), responsables además de la contaminación atmosférica causante del cambio climático. EE.UU. produce sólo el 12% de la producción mundial de petróleo, pero consume el 25% y es el responsable directo de la cuarta parte de las emisiones de CO₂ con tan sólo el 4% de la población. (Alarcón, 2006)

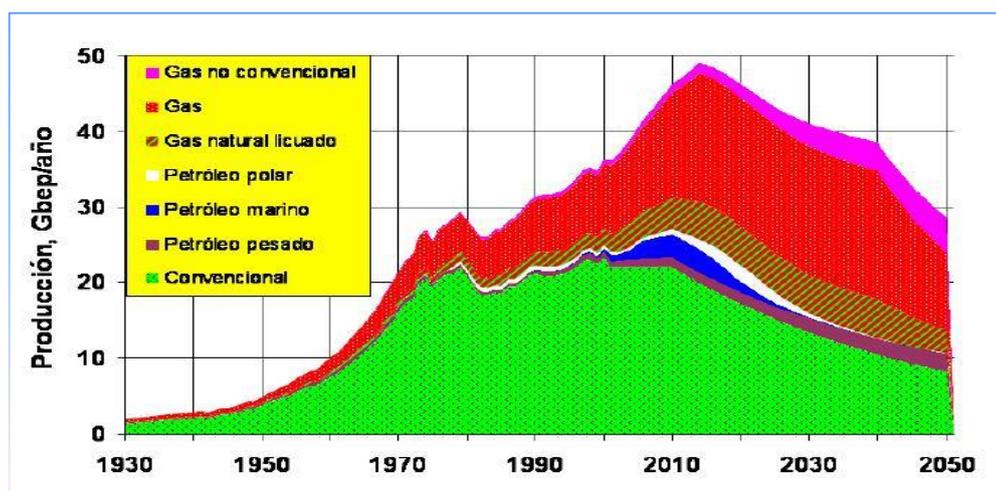


Figura 1: Evolución de producción de combustibles fósiles desde 1930 y estimación de evolución de dicha producción. (Alarcón, 2006)

El principal problema no es cuando se va a “acabar” el petróleo, sino cuando se producirá el denominado “oilpeak”: momento en el cual la demanda será claramente superior a la capacidad de producción (limitada por las condiciones de presión internas de los yacimientos). Por otra parte, el uso masivo de combustibles fósiles tiene asociado el agravamiento del importante problema de generación masiva de CO₂, afectando a la problemática del cambio climático como resultado directo de su incremento en la atmósfera (producto de la quema de combustibles fósiles). La relación entre la concentración de CO₂ y el calentamiento global esta claramente demostrado y asumido por la comunidad científica. (Alarcón, 2006)

2.8.- POTENCIAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Las tecnologías de las fuentes renovables para producir electricidad, generar calor o mover el transporte están cada vez más contrastadas, aunque hasta la fecha sólo algunas han empezado a abrirse campo en el mercado de forma clara. En la actualidad su contribución es pequeña y su potencial es muy alto, además de las ventajas ambientales, no hay que olvidar la posibilidad de generación de riqueza autóctona que poseen estas energías (eólica, solar fotovoltaica, solartérmica, biomasa, biocarburantes, etc.). Este potencial, en el caso sobre todo de las energías geotérmica, solar y eólica, es especialmente elevado. Durante los últimos 33 años, aunque el crecimiento global de las energías renovables ha sido similar al crecimiento de la producción de energía primaria, el crecimiento de las energías renovables indicadas anteriormente ha sido muy superior. Otros datos que demuestra que las energías renovables son el sector energético que más está creciendo los tenemos en que, entre 1993 y el 2007, la potencia eólica instalada se incrementó en todo el mundo un 30%, y la de las plantas fotovoltaicas, un 21,5%, porcentajes muy superiores a los del gas natural (2,2%), petróleo (1,3%), carbón (1%) o nuclear (0,6%) (ALARCÓN, 2010)

2.9.- RELACIÓN DE LAS ENERGÍAS CONVENCIONALES Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN DESALACIÓN DE AGUA

La relación de las energías convencionales y las energía renovables en la desalación del agua, esta basada en que al utilizar energías convencionales requieren fuentes de energía eléctrica que proviene de la quema de combustibles fosiles, el cual es costoso desde el punto de vista económico como ambiental, en cambio las energías renovables se presentan como una de las herramientas más prometedoras para alcanzar soluciones viables y sostenibles, entre ellas la energía solar en particular, es la más adecuada para solucionar los problemas de desalinización del agua. La importancia del problema de la escasez de agua potable se hace especialmente grave en los países en vías de desarrollo y del denominado tercer mundo, siendo además uno de los retos más importantes que tiene la humanidad para mejorar la calidad de vida, crecimiento y desarrollo económico de un tercio de la población del planeta.

2.10.- ENERGÍA SOLAR.

La energía solar puede definirse como la energía emitida por el sol, que se propaga en todas direcciones, a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Estas ondas conforman el espectro electromagnético, que está compuesto por rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos y ondas de radios, convencionalmente el espectro de energía radiante se divide en varias regiones tal como se muestra en la tabla N° 4, Los límites de estas regiones están determinados por métodos experimentales de detección (Geankoplis, 1998).

Tecnológicamente se ha trabajado en calentadores solares de agua. Secadores solares de productos alimenticios y en paneles solares fotovoltaicos, con menor incidencia en otras aplicaciones. Las instalaciones solares termoeléctricas están de moda en el planeta. Convencidas de las ventajas medioambientales y económicas de esta energía renovable,

diversas empresas e instituciones han puesto en pie varias plantas y esperan acabar muchas más a medio plazo. Las plantas de energía termo solar podrían abastecer de electricidad renovable a cientos de miles de personas y reducir de manera considerable las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 4.

Regiones del Espectro Electromagnético

Denominación	Límites de Longitud de Onda	
	Unidades Comunes	Longitudes de Onda (m)
Rayos X	$10^{-2} - 10^{20} \text{A}$	$10^{-12} - 10^{-12}$
Ultravioleta lejano	10 – 200 nm	$10^{-8} - 2.0 \times 10^{-7}$
Ultravioleta cercano	200 – 400 nm	$2.0 \times 10^{-7} - 4.0 \times 10^{-7}$
Visible	400 – 750 nm	$4.0 \times 10^{-7} - 7.5 \times 10^{-7}$
Infrarrojo cercano	0.75 – 2.5 nm	$7.5 \times 10^{-7} - 2.5 \times 10^{-6}$
Infrarrojo medio	2.5 – 50 nm	$2.5 \times 10^{-6} - 5.0 \times 10^{-5}$
Infrarrojo lejano	50 – 1000 nm	$5.0 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$
Microondas	0.1 – 100 cm	$1 \times 10^{-3} - 1.0$
Ondas de radio	1 – 1000 m	$1.0 - 10^3$

Fuente: (Geankoplis, 1998).

La intensidad de la energía solar disponible en un punto determinado de la tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día, año, la hora y de la latitud. Además la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

Ventajas del uso de la Energía solar: Gratuita, inagotable y no contamina

Inconvenientes: Es una energía estacionaria, irregular y no se puede almacenar si no es transformada previamente en energía eléctrica o térmica.

Captación Térmica: Hay dos métodos; el pasivo y el activo

Método Pasivo: Se utiliza una instalación desalinizadora que con el calor del sol provoque la evaporación del agua salobre, que se condensa y se precipita en el canal.

Método Activo: Se utiliza un colector solar plano que está formado por una tubería por la que circula el agua salobre.

2.11.- DISPOCISIÓN DE ENERGIA SOLAR EN PERU

El Atlas de Energía Solar del Perú elaborado por el Ministerio de Energía y Minas 2003, señala que el país cuenta con una elevada radiación solar, 5.5 a 6.5 kWh/m² en la sierra; 5.0 a 6.0 kWh/m² en la Costa y en la Selva de aproximadamente 4.5 a 5.0 kWh/m². Cifras que denotan el alto potencial fotovoltaico que tiene el Perú, el cual debe ser aprovechado para generar energía limpia para sus habitantes.

En la siguiente figura se muestra el mapa con los valores de Irradiación solar en cusco.

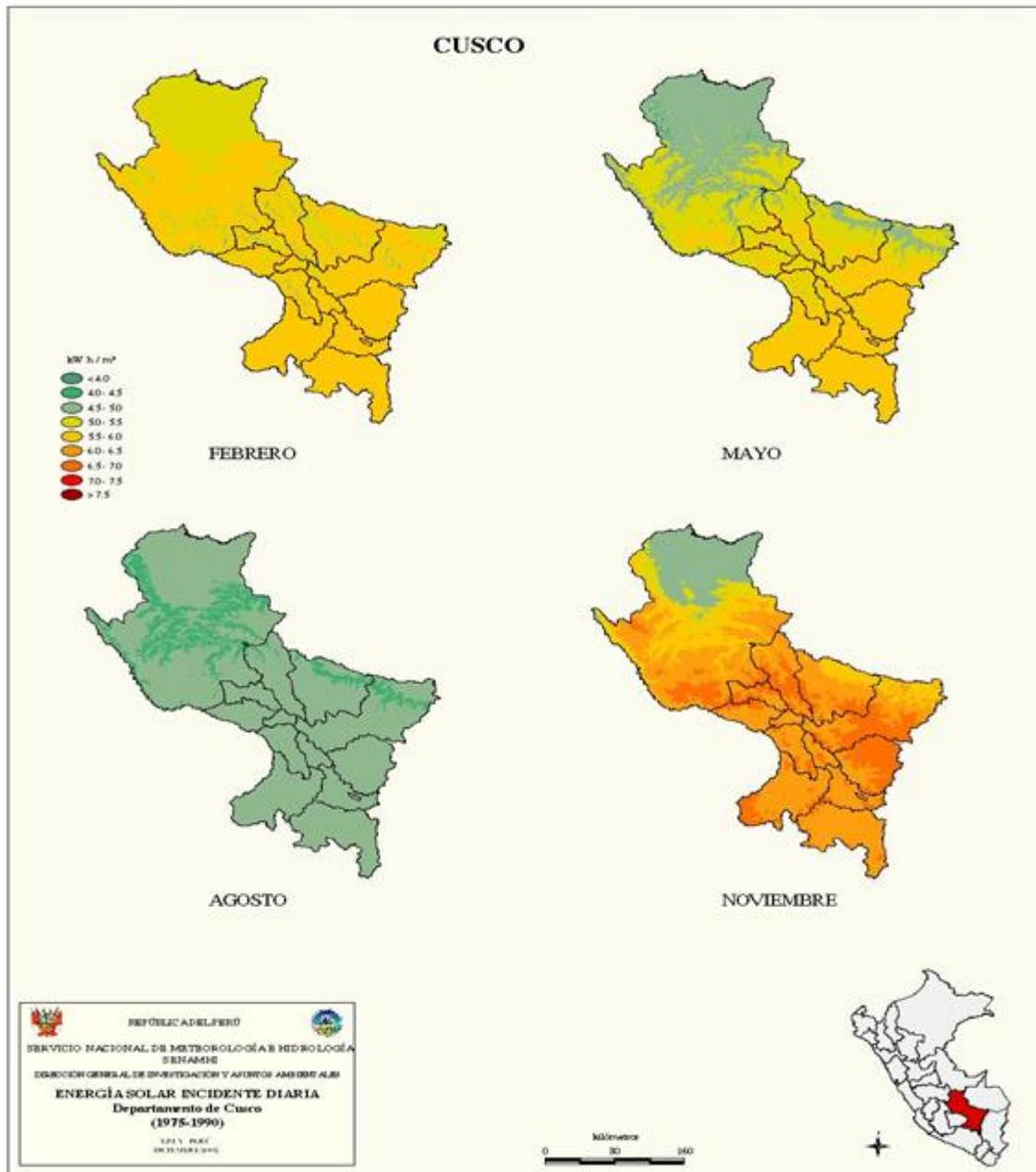


Figura 2.2: Mapa de Irradiación solar en Cusco, kWh/m² al día, Fuente: [Senamhi, 2003]

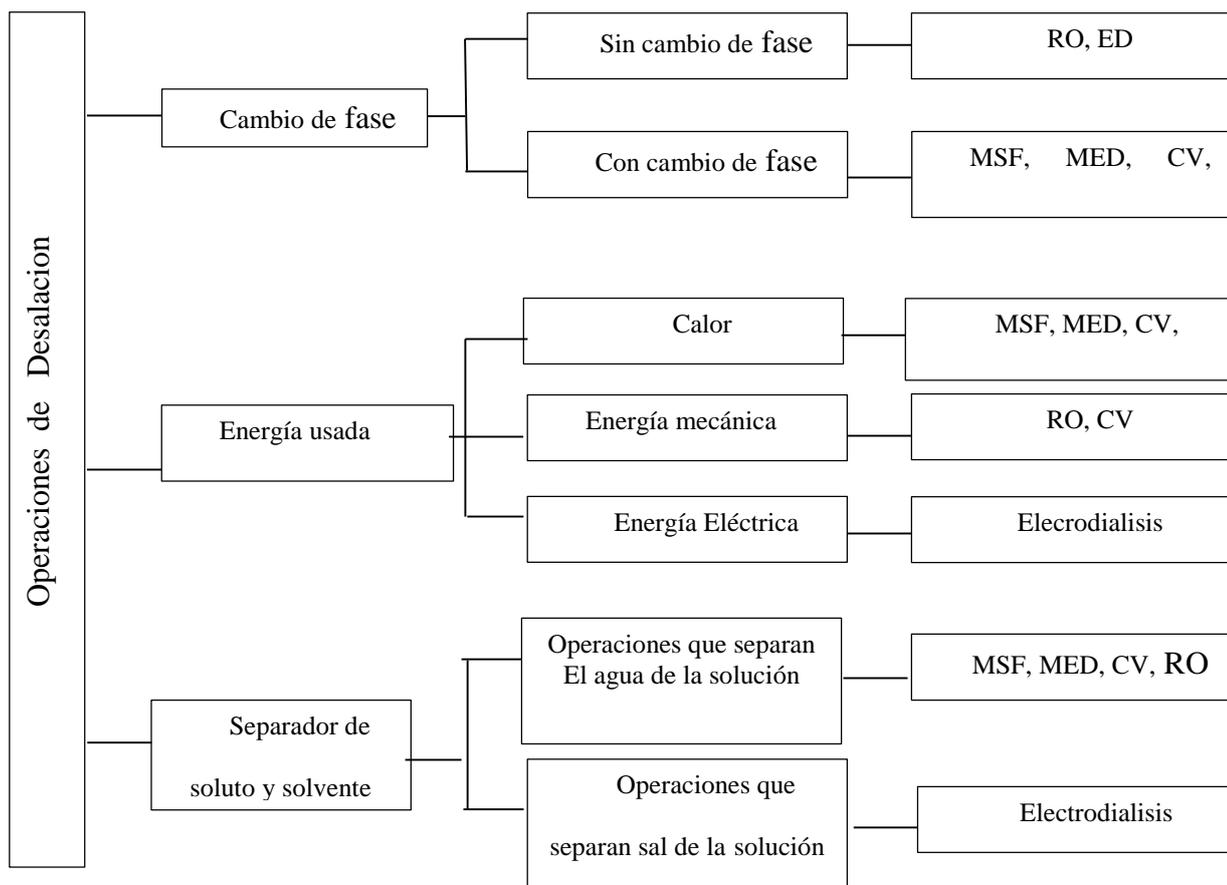
2.12.- DESALINIZACIÓN

La separación de agua o sal, a partir de agua salada, es un proceso termodinámico que requiere de energía. Un proceso ideal de desalinización es considerado como un proceso de separación reversible, en el cual las entradas y salidas del fluido están en las mismas condiciones de presión y temperatura, a pesar de que el calor y/o trabajo estén siendo aplicados.

El mínimo trabajo necesario para desalar agua con un total de sólidos disueltos de 3500 mg/l, es de alrededor de 0.7 kWh/m³, suponiendo una reversibilidad termodinámica completa. En la práctica, los procesos de desalinización, están lejos de ser reversibles. Ya sea aplicando calor y/o trabajo, como resultado se obtiene en la salida, un fluido con distinta presión y temperatura, en comparación con el fluido de entrada. Sin embargo, las más eficientes tecnologías de desalación, tienen un requerimiento de energía de 4-5 kWh/m³ (AGENCY, 2000)

2.12.1.- OPERACIONES EXISTENTES DE DESALINIZACIÓN.

Las operaciones de desalinización pueden ser clasificadas con base al cambio de fase, tipo de energía que usa y separación del solvente y soluto.



Operaciones de desalación: Ósmosis Inversa (RO), Electrodiálisis (ED), Flashing en Múltiple Etapa (MSF), Destilación en Múltiple Efecto (MED), Compresión de Vapor (CV) (AGENCY, 2000)

En general, las operaciones de desalinización, pueden ser clasificados en dos categorías según (ENERGY, 1997).

2.12.1.1.- OPERACIONES QUE SEPARAN AGUA DEL AGUA SALADA.

a) Operaciones de Destilación:

Las operaciones por destilación se basan en el ciclo hidrológico natural del agua, entre ellas se tiene:

- Destilación súbita de simple etapa
- Destilación en tubos sumergidos
- Destilación súbita multietapa
- Destilación multiefecto por tubos horizontales
- Destilación multiefecto por tubos verticales
- Comprensión mecánica de vapor
- Termo compresión de vapor
- Destilación solar

b) Cristalización: Congelación y Formación de hidratos

La cristalización es una técnica que consiste en enfriar el agua salobre hasta un punto de congelación (-2°C), en donde se obtiene cristales de agua pura, mientras que el resto de la solución se enriquece en sales disueltas, separando los cristales de hielo y aumentando la temperatura se obtiene agua dulce.

c) Filtración: Osmosis inversa, separación por membrana

La ósmosis Inversa es un proceso de separación por membrana, donde las membranas son permeables al agua, pero esencialmente impermeables a solutos (un ejemplo de ello es el

cloruro de sodio). Las membranas de ósmosis inversa tienen un tamaño de poro de 0.3 a 0.5 nm, que es menor al tamaño de poro de otro tipo de membranas de separación (Ultrafiltración y Nanofiltración), por lo tanto pueden retener partículas más pequeñas que estas últimas. En general, la principal aplicación de la ósmosis inversa ha sido la desalinización de agua salobre subterránea o de agua de mar (Barker, 2004).

2.12.1.2.-OPERACIONES QUE SEPARAN SALES DEL AGUA SALADA.

a) Electrodialisis

La electrodiálisis es un proceso electroquímico en el cual se mueven sales selectivamente a través de membranas, dejando atrás agua dulce como producto. Las sales son compuestos químicos formados por cationes y aniones que se disocian cuando se encuentran disueltos en agua. Cuando se aplica un voltaje de corriente directa a una solución salina, los iones con carga positiva tienden a viajar a través de la solución hacia el electrodo de carga negativa, mientras que, los iones con carga negativa tienden a migrar hacia el electrodo de carga positiva. Es posible desalinizar agua aprovechando este efecto, usando membranas selectivas de intercambio iónico, que permitan el paso de iones positivos o iones negativos, pero no ambos. Los sistemas de electrodiálisis usan arreglos de membranas alternados, donde una membrana selectiva de aniones es seguida de una membrana selectiva de cationes (CLAUDIO, 2018, págs. 23-24)

Se colocan espaciadores para generar un canal que lleve el agua de producto, mientras que el siguiente canal lleva la solución concentrada o salmuera.

b) Intercambio Ionico.

El intercambio iónico es la operación que permite la separación de especies iónicas disueltas mediante su transferencia desde la fase líquida a un material intercambiador sólido, en el que sustituyen a otros iones del mismo signo eléctrico, que a su vez pasan a la fase líquida. En el proceso, de naturaleza reversible, no se producen transformaciones químicas en

las especies iónicas que intervienen ni en el material intercambiador, circunstancia que permite su recuperación tras el intercambio iónico. La mayoría de estas operaciones presentan muchas desventajas para su uso como en los casos de multiflash y múltiple efecto, pues son grandes consumidores de energía de origen fósil, además del funcionamiento a altas temperaturas de estos procesos plantean frecuentemente problemas de corrosión (Sanchez, 2015)

En estas operaciones uno de los factores que más pesan hoy en día es el consumo de energía ya que se tiene que tomar en cuenta el aumento constante de los precios de la energía que sumados al costo de las instalaciones auxiliares, especialmente para bombeo que son indispensables para el funcionamiento de estas unidades, elevan el costo de el agua dulce.

2.12.2.- ESTADÍSTICAS Y COSTOS DE PROCESAMIENTO EN OPERACIONES DE DESALACIÓN.

Actualmente las tecnologías para la desalación de agua de mar o agua salobre, solo los procesos de Flashing en Múltiple Etapa (MSF), Destilación en Múltiple Efecto (MED) y el proceso de membrana de Ósmosis Inversa (RO), han tenido aplicaciones comerciales a gran escala. En años recientes, se ha tenido un gran interés en los procesos híbridos, que consisten en combinaciones de algún proceso de destilación con la Ósmosis Inversa.

Segun la revista especializada en el Sector Construcción, Perú construye 2019, conversó con especialistas de cuatro empresas dedicadas al tratamiento del agua ya sea para consumo humano o para uso industrial a fin de que nos hablen sobre la ósmosis inversa, tecnología más usada para desalinizar el agua de mar o agua salobre. Al respecto Fernando Cortabitarte, director de operación y mantenimiento en Plantas de Desalinización de Acciona Agua, señaló que los procesos más extendidos para eliminar las sales del agua son la ósmosis inversa y los procesos térmicos. “El primer caso, es el más utilizado en todo el mundo, el cual se fundamenta en el rechazo de sales en una membrana para lo que es necesario superar la

presión osmótica del agua salada. Mientras que el segundo se basa en la utilización del calor para evaporar o destilar el agua salada, este proceso demanda mucha energía térmica y está muy extendido en el Oriente Medio

La Tabla 8 muestra una comparación de costos aproximados de producción (USD/m³) y consumos energéticos (kWh/m³) entre tecnologías térmicas y de membranas a nivel global.

Tabla 5.

Comparación de Costos Aproximados de Producción y Consumos Energéticos Entre Tecnologías Térmicas y de Membranas.

Tecnología	Costos de producción (usd/m ³)	Consumo energético	Recomendable para
Osmosis Inversa (RO)	0.6	2.4 a 2.8 kWh/m ³	Agua de mar y salobre
Electrodialis (ED)	0.32	2 a 2.5 kWh/m ³	Agua salobre
Destilación multiefecto (MED)	15	3.4 a 4 kWh/m ³	Agua de mar
Destilación Flashing Multietapa (MSF)	1.10	5 a 8 kWh/m ³	Agua de mar

FUENTE: (Devora Isisordia, 2013)

2.12.3.- GEOGRAFÍA DE LA DESALACIÓN CON ENERGÍA SOLAR

La capacidad global de las plantas desaladoras, incluyendo la desalinización renovable, crecerá a un ratio anual del 9% entre 2010 y 2016, con especial incidencia en Estados Unidos, China, Arabia Saudí y los Emiratos Árabes Unidos.

La desalación está creciendo tan rápido que es más que seguro que jugará un papel fundamental en el abastecimiento de agua en los próximos años. Este crecimiento se da con mayor fuerza en los países con una baja disponibilidad de acceso al recurso y tenderá a acentuarse en los

próximos años según se explica en el documento Desalination Technologies: Hellenic Experience, elaborado por los investigadores Konstantinos Zotalis, Emmanuel G. Dialynas, Nikolaos Mamassis y Andreas N. Angelakis.

La región de Oriente Medio tiene el mayor número de plantas, seguida por el Mediterráneo, América y Asia, tal y como se puede ver en esta figura: (Konstantinos Zotalis, 2015)

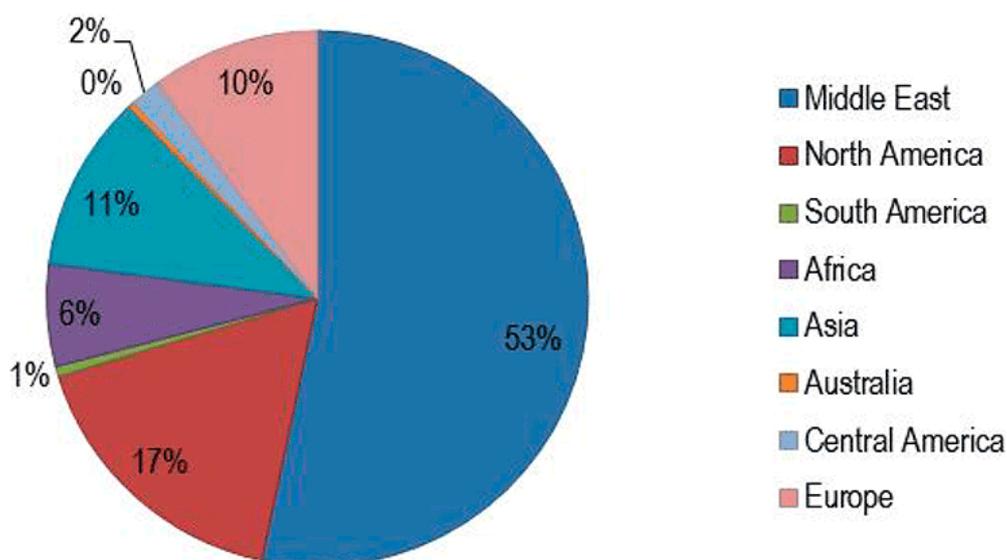


Figura 2.1: La desalación en el mundo.

2.13.-DESTILACIÓN

La destilación es una operación por la cual, mediante la aplicación de calor se puede separar las distintas sustancias de una mezcla líquida, basándose en las diferencias de volatilidad, se utiliza con frecuencia para la purificación y aislamiento de líquidos orgánicos, aprovechando las volatilidades y puntos de ebullición de los componentes líquidos a separar. La destilación depende de parámetros como: equilibrio líquido vapor, temperatura, presión, composición y energía, el equilibrio entre el vapor y el líquido de una solución está representado por la relación de moles de vapor y líquido a una temperatura determinada, también puede estudiarse este equilibrio a partir de sus presiones de vapor, la temperatura

influye en las presiones de vapor y en consecuencia de la cantidad de energía proporcionada al sistema, también influye en la composición del vapor y el líquido ya que esta depende de las presiones del vapor (MARTINEZ, 2015)

2.14.- PROCESOS DE DESTILACIÓN

En la práctica, la destilación puede llevarse a cabo según dos métodos principales. El primer método se basa en la producción de vapor mediante la ebullición de la mezcla líquida que se desea separar y condensación de los vapores sin permitir que el líquido retorne al calderín. Es decir, no hay reflujo. El segundo método se basa en el retorno de una parte del condensado a la columna, en condiciones tales que el líquido que retorna se pone en íntimo contacto con los vapores que ascienden hacia el condensador. Cualquiera de los dos métodos puede realizarse de forma continua o por cargas. (McCabe, 1991).

La forma de aportar al ciclo la energía necesaria para lograr el cambio de estado y los sistemas de recuperación del calor latente del vapor al condensarse, diferenciarán unos procesos de otros. Posteriormente se fue complicando el proceso hasta llegar a los evaporadores con varias etapas y recirculación de salmuera, que son los utilizados en la actualidad. Los procesos de evaporación en este momento se encuentran casi en su techo de desarrollo tecnológico.

2.14.1.- DESTILACIÓN SOLAR.

La destilación solar es una operación que permite purificar una solución, basándose en la separación del agua mediante evaporación y la condensación posterior de dicho vapor, reemplazando el uso de energía convencional por energía solar. Cuando en las condiciones predominantes el soluto no es volátil, la destilación se lleva a cabo evaporando el solvente en

determinada región de la bandeja y condensando en otra región de la misma. Por tradición se llama destiladores a los dispositivos que permiten llevar a cabo la desalación (McCabe, 1991)

En el argot de la Ingeniería Química, esta operación se llama simplemente “desalación”; sin embargo, la costumbre ha hecho que en el mundo de la energía solar se conozca como destilación solar (en ingeniería química, el término destilación se aplica a la técnica de sustancias volátiles aprovechando su diferente volatilidad como en el caso de las mezclas alcohol – agua, etc.). [ITESO, 1995]

La destilación solar es una operación de desalación de aguas de mar, salobres, mediante **evaporación**, utilizando de modo pasivo las energías disponibles en la radiación solar, haciendo uso del efecto invernadero. En el caso de la destilación solar, el sol representa el único requerimiento de energía en este proceso. Las condiciones de equilibrio térmico durante el funcionamiento del destilador solar, son tales que la superficie del vidrio de dicho destilador se encuentre a una temperatura más baja que la de la mezcla vapor-aire.

La destilación solar a temperaturas relativamente bajas ($47^{\circ}\text{C} - 65^{\circ}\text{C}$) resulta ser un sistema muy sencillo, eficiente y de fácil accesibilidad para todo tipo de sociedades. Aplicado de forma masiva podría evitar un buen número de enfermedades en los países pobres producto del consumo de agua en mal estado de conservación, como fuente de calor, la energía solar puede emplearse para destilar. Ya sea concentrándola y alcanzando altas temperaturas o bien a temperaturas bajas.

La aplicación que más ampliamente se le ha asignado a la destilación solar, es la obtención de agua potable a partir de aguas salobres, tal operación se ejecuta de una forma completamente diferente a los otros métodos de purificación. Los otros procesos tienen el propósito de mantener una razón de producción constante en todas las horas del día y durante

las cuatro estaciones del año. La producción obtenida en la destilación solar depende de la incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre.

En la relación entre la temperatura y la presión de vapor de agua se puede verificar que a temperaturas progresivamente superiores a la del ambiente, una pequeña diferencia de temperatura genera un notable aumento en la presión de vapor.

Además del valor de la radiación y de las características constructivas del destilador como: cubierta transparente, material y aislamiento, etc., otros elementos que influyen en el rendimiento total del destilador solar son: la temperatura ambiente, el nivel del agua salobre en el destilador, generalmente de 1 a 100 cm, según las dimensiones de la instalación, la velocidad y la dirección del viento.

2.14.2.- EVAPORACIÓN.

La evaporación es una operación física que consiste en el pasaje lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, en función de un aumento de temperatura, lo que produce influencia en el movimiento de las moléculas, agitándolas. Con la intensificación del desplazamiento, las partículas escapan hacia la atmósfera transformándose, consecuentemente, en vapor, la evaporación es un fenómeno en el cual átomos o moléculas en el estado líquido ganan energía suficiente para pasar al estado de vapor.

El movimiento térmico de una molécula de líquido debe ser suficiente para vencer la tensión superficial y evaporar, esto es, su energía cinética debe exceder el trabajo de cohesión aplicado por la tensión superficial a la superficie del líquido. Por eso, la evaporación acontece más rápidamente a altas temperaturas, a altos caudales entre las fases líquidas y vapor y en líquidos con bajas tensiones superficiales (esto es, con presión de vapor más elevado).

Vista como una operación unitaria, la evaporación es utilizada para eliminar el vapor formado por ebullición de una solución líquida para así obtener una solución concentrada. En la gran mayoría de los casos, la evaporación vista como operación unitaria se refiere a la eliminación de agua de una solución acuosa.

En destilación solar el objetivo de la evaporación es concentrar una disolución consistente en un soluto no volátil y un disolvente volátil. La evaporación se realiza vaporizando una parte del agua salobre para producir una disolución concentrada. La evaporación difiere del secado en que el residuo es un líquido a veces altamente viscoso en vez de un sólido; difiere de la destilación en que el vapor es generalmente un solo componente y, aun cuando el vapor sea una mezcla, en la evaporación no se intenta separar el vapor en fracciones; difiere de la cristalización en que su interés reside en concentrar una disolución y no en formar y obtener cristales. En ciertas situaciones, por ejemplo, en la evaporación de salmuera para producir sal común, la separación entre evaporación y cristalización dista mucho de ser nítida. La evaporación produce a veces una suspensión de cristales en unas aguas madres saturadas (McCabe, 1991).

A diferencia de la destilación, este proceso se produce a cualquier temperatura, siendo más rápido cuanto más elevada aquélla. La evaporación es importante e indispensable en la vida cuando se trata del agua, que se transforma en nube y vuelve en forma de lluvia, nieve, niebla o rocío, si la evaporación ocurre en un recipiente cerrado, las moléculas que escapan del líquido se acumulan en forma de vapor arriba del líquido. Muchas de esas moléculas regresan al estado líquido. Cuando el proceso de escape y regreso alcanza un equilibrio, el vapor se llama vapor saturado y no ocurren cambios adicionales en la presión de vapor o en la temperatura del líquido (SARTORI, 1996).

2.14.3.- PARÁMETROS DE LOS DESTILADORES SOLARES.

El objetivo para determinar los parámetros de diseño para la construcción del prototipo del destilador solar, se baso en experimentar que de acuerdo a las condiciones climáticas, y dimensionamiento del equipo, se llegue a obtener la cantidad de agua apta para consumo humano, especificado en referencias bibliográficas, en la ciudad del Cusco, por tanto se tomo en cuenta los siguientes parámetros.

- **PARÁMETROS EXTERNOS**

Parámetros de insolación.- Estos son: constante solar, las horas del día y la latitud geográfica.

Parámetros Meteorológicos.- Los más importantes son. La velocidad del viento a lo largo de la cubierta, temperatura ambiente y humedad relativa del ambiente.

- **PARÁMETROS INTERNOS**

Parámetros Geométricos.- estos son:

- Ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio del destilador solar
- Área del destilador solar

- **PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO**

Dentro de ellos se tiene:

- Altura del nivel del agua a destilar.
- Temperaturas del sistema.

Además es importante mencionar que, la función del destilador solar o evaporador, es transferir vapor de agua al aire que se encuentra dentro del destilador solar para saturarlo. La única función del aire es servir como medio de transporte, para las moléculas de agua que viajan del evaporador al condensador. Los destiladores solares pequeños utilizan, como medio

para este “viaje” la difusión molecular. Para el proceso de difusión molecular, la distancia es un elemento de resistencia al transporte de las moléculas, por tanto la distancia que separa al evaporador del condensador debe ser pequeña para evitar los efectos por acumulación térmica (Tiesen, 1995)

2.15.4.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESTILACIÓN SOLAR.

El líquido (agua de mar, agua salobre u otro no potable) para destilar, se deposita, en el destilador. La radiación proveniente del sol atraviesa la cubierta de vidrio del destilador y es absorbida por la base pintada de negro, la cual aumenta la temperatura del agua y, por ende, su presión de vapor. Parte del agua de la base se evapora, hasta que el aire dentro del destilador alcance una humedad relativa del 100%. El aire húmedo y caliente, por ser menos denso, sube hasta la cubierta de vidrio. La cubierta de vidrio, por estar cediendo calor al ambiente, se encuentra a una temperatura inferior que la del aire del interior, razón por la cual parte de la humedad que éste contiene se condensa. El agua condensada se desliza por la superficie inclinada del vidrio cayendo en el colector que lo recoge y lo lleva al depósito, donde se almacena el agua destilada y el residuo (sal u otros minerales) se queda dentro del destilador. Este proceso de evaporación y condensación ocurre continuamente mientras el destilador esté recibiendo energía solar.

Además el proceso de condensación sigue después de la puesta del sol, debido a la disminución de la temperatura ambiente, es importante asegurarse que para un mejor aprovechamiento del destilador, no debe tener ningún árbol o edificio cerca del sistema, para no producir sombras en dicho equipo.

En general los destiladores solares para la purificación de aguas, son adecuados para potabilizar aguas superficiales (ríos, lagos), aguas salobres, aguas subterráneas y aguas de

mar, pero no son adecuados para purificar aguas negras, ni residuos industriales (Nandwani, 2013).

Para eliminar los microorganismos no se requiere llegar a la temperatura de ebullición, si no que basta pasar los 60°C. Existen estudios en los que reporta haber eliminado con éxito una diversidad de microorganismos en forma continua durante varios meses (Tiesen, 1995)

2.15.5.-TIPOS DE DESTILADORES SOLARES.

Existen múltiples tipos y tamaños de destiladores solares, aunque en todos el mecanismo de funcionamiento es semejante, la configuración de los distintos elementos determina que éstos tengan una mayor o menor eficiencia. (Lema, 2015, págs. 39-40)

A.- DESTILADOR SOLAR DE CASETA.-Este modelo consta de una caja cubierta por un cristal inclinado. Llamado también destilador solar de una vertiente, la caja está dividida en dos compartimentos: uno con el fondo de color negro donde se coloca el agua a evaporar y que ocupa la mayor parte de la caja y el otro el receptáculo donde se recoge el agua destilada y que se encuentra en el lado de menor altura. Algunos fabricantes los denominan “células solares destiladoras” ya que algunos tienen la posibilidad de interconectarse entre si para ampliar la instalación de manera modular.

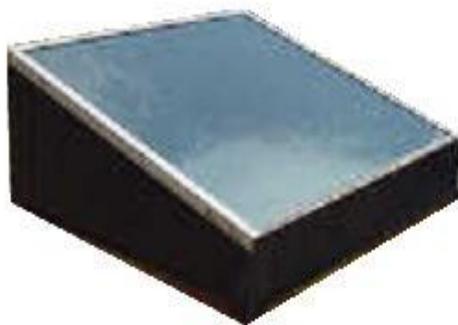


Figura 2.3: Destilador solar de caseta

B.- DESTILADOR SOLAR DE DOS VERTIENTES.- Este modelo consta de un “tejado” de material transparente de dos vertientes. Las gotas de agua que se han condensado en el panel transparente se deslizan por los lados y precipitan a un depósito situado bajo la bandeja donde se dispone el agua para destilar. Desde el depósito de almacenamiento se extrae el agua por medio de un grifo.



Figura 2.4: Destilador solar de dos vertientes

En este modelo la captación de energía solar es en principio más eficiente que en el modelo anterior ya que no existen paredes que puedan proyectar sombras al interior de la caja.

C.- DESTILADOR SOLAR DE INVERNADERO.- Este es un modelo de destilador solar de gran tamaño. Se trata de estructuras de invernaderos que en su interior albergan un estanque de agua de poca profundidad y con el fondo de color negro. El agua evaporada se condensa en las paredes del invernadero y se desliza hacia los receptáculos situados en la base de las paredes. En esencia es el mismo modelo que el destilador solar de dos vertientes pero de grandes proporciones.

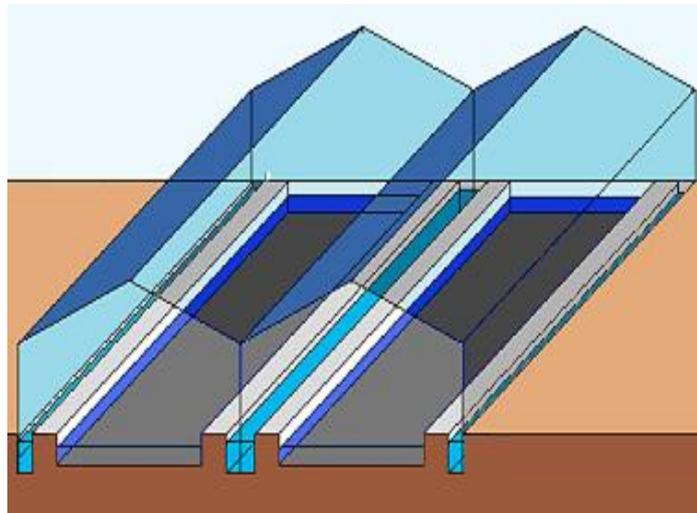


Figura 2.5: Destilador solar de invernadero

D.- DESTILADOR SOLAR DE CASCADA.- Este tipo de destilador esta en forma de terrazas. En la parte superior de cada una de las terrazas se disponen los estanques con fondo de color negro llenos de agua para destilar. Cuando la radiación solar incide en el destilador comienza la evaporación. El agua en estado gaseoso se condensa en una superficie transparente dispuesta de forma inclinada sobre las terrazas y se desliza hacia el receptáculo situado en la parte baja del destilador.

El nombre de cascada le viene dado por los momentos en los que se repone agua para destilar o en los que se efectúan labores de limpieza. En estos procesos se deja correr el agua desde una cañería en la parte superior provocando el efecto cascada conforme esta se desliza

por las terrazas. En la base del destilador hay un desagüe para recoger la salmuera u otros residuos dejados por el agua al evaporarse.

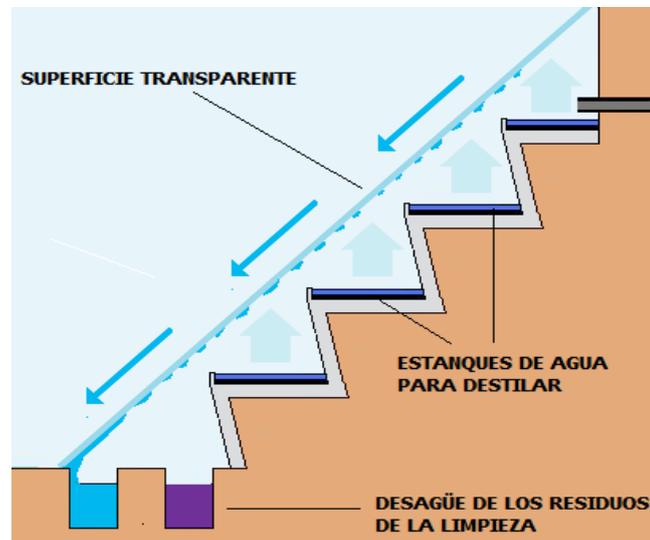


Figura 2.6: Destilador solar de cascada.

E.- DESTILADOR SOLAR ESFÉRICO DE BARREDERA.- La particularidad de este tipo de destilador se basa en la forma esférica del material transparente así como en la introducción de una barredera que lame su cara interna y que está accionada por un pequeño motor. En una bandeja con fondo de color oscuro situada en la parte central de la esfera se coloca el agua a destilar.

Este tipo tiene forma esférica buscándose favorecer la captación solar al evitarse las sombras que alguna parte del destilador pueda provocar en otra. Además la forma esférica logra mantener una mayor inercia térmica facilitando un mayor aprovechamiento del calor producido por la energía solar.

Por su parte la barredera arrastra las pequeñas gotas que se van formando en el interior de la esfera juntándolas y provocando que se precipiten por gravedad a la parte baja donde se acumulan. Con el sistema de barredera se evita que las gotas reflejen la radiación solar y se

permite que el agua en estado gaseoso se condense con mayor facilidad en las paredes. Estos factores aumentan el rendimiento del equipo si bien como contrapartida se tiene que es necesario suministrarle energía eléctrica para hacer posible el movimiento de la barredera.

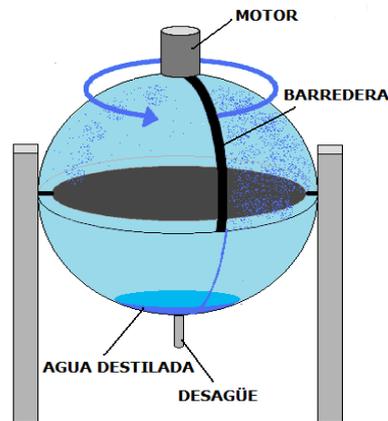


Figura 2.7: Destilador solar esférico de barredera

F.- DESTILADOR SOLAR MULTITAPA.- Este es un tipo de destilador más complejo y eficiente que emplea sistemas de colectores solares complejos (concentradores parabólicos, tubos de vacío, e incluso sistemas de placa plana de alta eficiencia) para alcanzar altas temperaturas y llevar al punto de ebullición al agua. El vapor de agua se condensa con ayuda de un refrigerante y el calor se recupera y se almacena en depósitos. Este sistema requiere ya de inversiones importantes.

2.16.6.- DESTILACIÓN SOLAR EN LA NATURALEZA.

En la naturaleza se produce la destilación a gran escala en el ciclo del agua. Mediante la energía que aporta el sol, se evapora el agua de los mares y de otras superficies húmedas, ascendiendo en la atmósfera y desplazándose en estado gaseoso impulsada por las corrientes de aire. Cuando se dan las condiciones adecuadas esta agua se condensa en forma de pequeñas gotas que se quedan suspendidas en la atmósfera formando las nubes. Si las condiciones siguen siendo adecuadas continua el proceso de condensación pasando al estado

líquido cada vez más cantidad de agua y haciéndose las gotas suspendidas cada vez más grandes y pesadas hasta el punto de que por gravedad empiecen a caer hasta el suelo produciéndose las precipitaciones (lluvia, nieve, granizo, etc.) (Loaiza, 2012)

2.17.- MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN DESTILACIÓN

Los mecanismos de transferencia de calor en destilación solar se describen a continuación por que, estos mecanismos ocurren en la purificación de aguas salobres que es el objetivo del trabajo de investigación cuyos conceptos y principios se aplican en el desarrollo del tema.

TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN DESTILADOR.-

Transferencia de calor (o calor) es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas.

Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario que puede ser un sólido o un fluido se utiliza el término conducción para referimos a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, el término convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. El tercer modo de transferencia de calor se denomina radiación térmica. La cual consiste en el intercambio de energía entre dos superficies a diferentes temperaturas mediante la emisión de radiación electromagnética (F. Incropera, 2007)

Aunque estos tres mecanismos de transferencia de calor pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por

conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra recibe calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

De acuerdo a la Figura 2.8, se puede describir que: La radiación solar incidente Global G , llega al fondo del destilador como energía, esta energía absorbida se transforma en calor. La transferencia de este calor en el destilador solar se lleva a cabo por mecanismos de conducción, convección y radiación las que se detallan en las secciones 2.13 y 2.14.

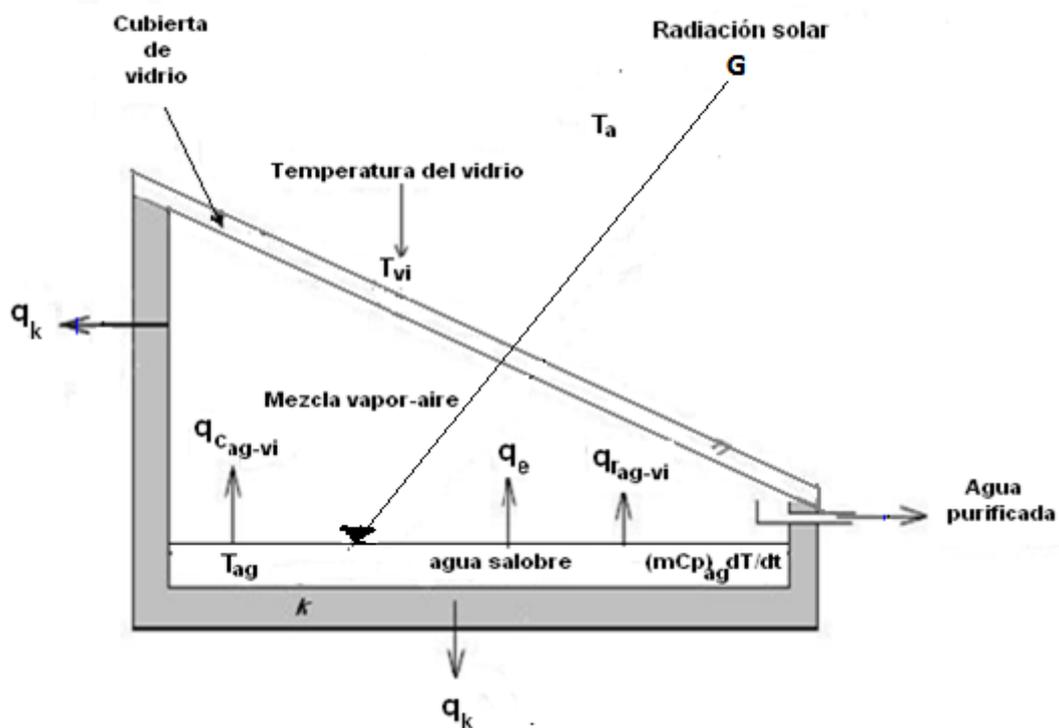


Figura 2.8: Mecanismos de transferencia de calor en un destilador solar tipo caseta.

La explicación detallada de la Fig. 2.8 se dará en la sección 2.13.

Donde:

$q_{r_{ag-vi}}$: Flujo de calor por radiación, W/m^2

$q_{c_{ag-vi}}$: Flujo de Calor por convección, W/m^2

q_e : Flujo de calor por evaporación – condensación, W/m^2

q_k : Flujo de calor por conducción, W/m^2

T_{ag} : Temperatura del agua, K

T_{vi} : Temperatura del vidrio, K

T_a : Temperatura ambiente, K

G_E : Radiación solar global, W/m^2

$(mCp)_{ag} \frac{dT}{dt}$: Energía absorbida en el destilador solar, W/m^2

2.17.1.- TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN DESTILACIÓN.

La conducción es la transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, donde las partículas más energéticas entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas.

La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. La capacidad que tiene un cuerpo para transmitir calor por conducción se mide por la conductividad térmica, clasificando a los materiales en conductores y aislantes.

El mecanismo de transmisión de calor por conducción en una sola dirección se expresa mediante la ley de Fourier:

$$\frac{q}{A} = k \left(\frac{\Delta T}{L} \right) \quad (2.3)$$

Es decir, que el flujo de calor por unidad de área es directamente proporcional a la disminución de la temperatura con la distancia L ; la constante de proporcionalidad k es la conductividad calorífica de la placa.

Por lo tanto, el calor fluye por conducción en la dirección en que el descenso de temperatura es más pronunciado.

De la ecuación (2.3), para el destilador solar se tiene:

$$\frac{q_k}{A} = \frac{k}{L}(T_{ag} - T_a) \quad (2.4)$$

Donde:

q_k : Flujo de calor por conducción, W/m^2

L : Longitud a través del cual se transmite el calor, m

k : Conductividad termica del destilador a través del cual fluye el calor

A : Área de la superficie, m^2

T_a : Temperatura ambiente, K

T_{ag} : Temperatura del agua, K

En principio, las pérdidas de calor por conducción en un destilador solar son transferidas a través de la base, la cubierta de vidrio y los lados del destilador solar, vía la tierra y alrededores.

2.17.2.-TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN EN DESTILACIÓN.

Este fenómeno de transferencia, es propio de los medios fluidos en contacto entre sí, o con cuerpos sólidos, en el que el calor se transfiere a través de choques moleculares y movimiento de la masa del o de los fluidos en movimiento, en contacto con un cuerpo sólido a diferentes temperaturas.

Cuando el destilador solar está en operación, el agua a destilar se calienta y empieza a evaporarse elevándose hacia la cubierta de vidrio. Este fenómeno da lugar a que en el interior del destilador, que inicialmente contenía solo aire a presión atmosférica, se genere una mezcla de aire y vapor de agua.

El agua a destilar estará a una temperatura mayor que de la cubierta de vidrio, la mezcla vapor-agua asciende hacia la cubierta por acción del empuje originado por el gradiente de temperaturas dentro del destilador, que producen variaciones en la densidad de la mezcla. Al proceso de transporte por movimiento de masa debido al empuje, se le llama convección natural.

La transferencia de calor por convección de la mezcla aire-vapor de agua, de la superficie libre del líquido a la cubierta de vidrio está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{q_{c,ag-vi}}{A} = h_c (T_{ag} - T_{vi}) \quad (2.5)$$

Donde:

$q_{c,ag-vi}$: Flujo de calor por convección, W/m^2

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2\text{°K}$

T_{ag} : Temperatura del agua a destilar, °K

T_{vi} : Temperatura del agua en el vidrio, °K

A : Área de la superficie del destilador, m^2

T_b : Temperatura de la base del destilador, °K

La transferencia de calor por convección es el modo en que las moléculas transfieren calor en forma unidireccional debido al movimiento que se establece en el fluido originado por cambios de densidad. Si el fluido se encuentra confinado en un recipiente de dos superficies, paralelas a las temperaturas T_{ag} y T_b ($T_{ag} < T_b$), el fluido cercano a T_b (el más frío) aumenta su temperatura y simultáneamente disminuye su densidad, por lo que aumenta la flotabilidad, ascendiendo hacia la superficie del vidrio (T_{vi}). Al ponerse el fluido en contacto con la superficie del vidrio cederá calor, se enfriará y aumentará su densidad de nuevo por lo que nuevamente se hundirá. La repetición de estos fenómenos formará el “movimiento convectivo” en el que el fluido extrae calor de la superficie del agua en la batea a la superficie del vidrio.

2.17.3.- TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN EN DESTILACIÓN.

La radiación es un mecanismo electromagnético, en el que la energía se transporta con la velocidad de la luz sin necesidad de un medio material. La radiación es la 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.

El mecanismo de radiación consiste en el intercambio de energía entre dos superficies que están a diferentes temperaturas, mediante la emisión de radiación electromagnética. El intercambio radiativo se basa en la capacidad de ambas superficies en emitir y/o absorber la radiación electromagnética. La capacidad de emitir radiación está medida por la emitancia ϵ , y la capacidad de absorberla está medida por la absorptancia α .

El cuerpo ideal negro o idealmente negro es un emisor y absorbedor perfecto en todas las longitudes de onda electromagnética a cualquier temperatura, es decir $\epsilon = \alpha = 1$

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 cantidad de energía emitida es función de la temperatura del cuerpo, de sus propiedades ópticas y de la llamada Constante de Stefan Boltzmann.

La ecuación que rige la radiación es:

$$q_{r,ag-vi} = A\sigma(T_{ag}^4 - T_{vi}^4) \quad (2.6)$$

Donde:

$q_{r,ag-vi}$: Flujo de calor por radiación, W/m^2 .

A : Área superficial del destilador solar, m^2

σ : Constante de Stefan Boltzmann, $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$

T_{ag} : Temperatura del agua, $^{\circ}K$

T_{vi} : Temperatura del vidrio, $^{\circ}K$

2.18.- RADIACIÓN SOLAR

El sol es una fuente de radiación casi esférica que tiene 1.39×10^9 m de diámetro y se localiza a 1.50×10^{11} m de la tierra. Para una superficie horizontal fuera de la atmósfera

terrestre, la radiación solar parece un haz de rayos casi paralelos que forman un ángulo θ , el ángulo cenital relativo a la superficie normal (F. Incropera, 2007)

La radiación solar tiene su origen en las reacciones termonucleares que se producen en el núcleo del sol. La radiación de todas las reacciones se emite hacia el espacio y se compone en su mayor parte de radiación de ondas cortas. Cuando la radiación encuentra un material, esta se refleja, la transmite o la absorbe.

La radiación que llega a la parte superior de la atmosfera sufre, en su trayectoria hacia la tierra diferentes procesos de atenuación debido a los constituyentes atmosféricos y tiene los siguientes componentes: radiación directa, radiación difusa, radiación global, y la radiación reflejada.

La radiación incidente o global es aquella radiación procedente del sol que incide sobre la superficie terrestre (difusa o directa). La radiación directa es la que llega a la superficie de la tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección. Mientras que la global proviene de otras direcciones (distintas a las del disco solar), debido a la reflexión y dispersión que producen en la radiación solar la atmosfera y las nubes.

Las cantidades de radiación incidente se expresan generalmente en términos de irradiancia o irradiación.

La irradiación no es sino la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante un cierto tiempo en una superficie o zona. Sus unidades son J/m^2 o Cal/cm^2 o también $Kw.h/m^2$. Mientras que irradiancia se define como la potencia de la radiación o energía instantánea que se emite o incide en cierta superficie o zona. Sus unidades son W/m^2 .

Según el Earth Observatory, NASA entre los años 1984 a 1994, la irradiación solar puede considerarse suficientemente elevada para considerar práctico y factible su aprovechamiento

mediante procesos tecnológicos. Aproximadamente una tercera parte de la superficie del globo recibe una radiación anual superior a los 1.5 kW.h/m^2 , con valores máximos incluso superiores a los 2.2 kW.h/m^2

2.19.- FENÓMENOS ÓPTICOS Y TÉRMICOS EN DESTILADORES SOLARES

En la Figura 2.9, se pueden observar los fenómenos más relevantes que ocurren en los destiladores solares. La radiación solar, G , incide sobre la cubierta transparente del vidrio, desde donde una parte de la energía es reflejada, otra parte de la energía es absorbida y otra parte de la energía es transmitida al interior del destilador. El material transparente (cubierta de vidrio) tiene una transmitancia selectiva, por lo que sólo la radiación con longitudes de onda que se encuentran por debajo de 2500 nm es capaz de atravesarla ($\tau_{vi}G$). La porción de G que llega a la superficie del agua ($\tau_{vi}G$) sufre nuevamente una descomposición debido a las características ópticas del agua; una parte es reflejada ($\rho_{ag}\tau_{vi}G$), otra es absorbida ($\alpha_{ag}\tau_{vi}G$) y otra es transmitida ($\tau_{ag}\tau_{vi}G$). La fracción de la radiación que se transmite hacia la base del contenedor es absorbida en su mayor parte ($\alpha_b\rho_{ag}\tau_{vi}G$) y ligeramente reflejada ($\rho_b\tau_{ag}\tau_{vi}G$), ya que el color negro pintado en la base del destilador posee una alta absorbancia y mínima reflectancia. Para el mayor entendimiento de los fenómenos ópticos a continuación se definen estos términos ópticos (sartori, 1996)

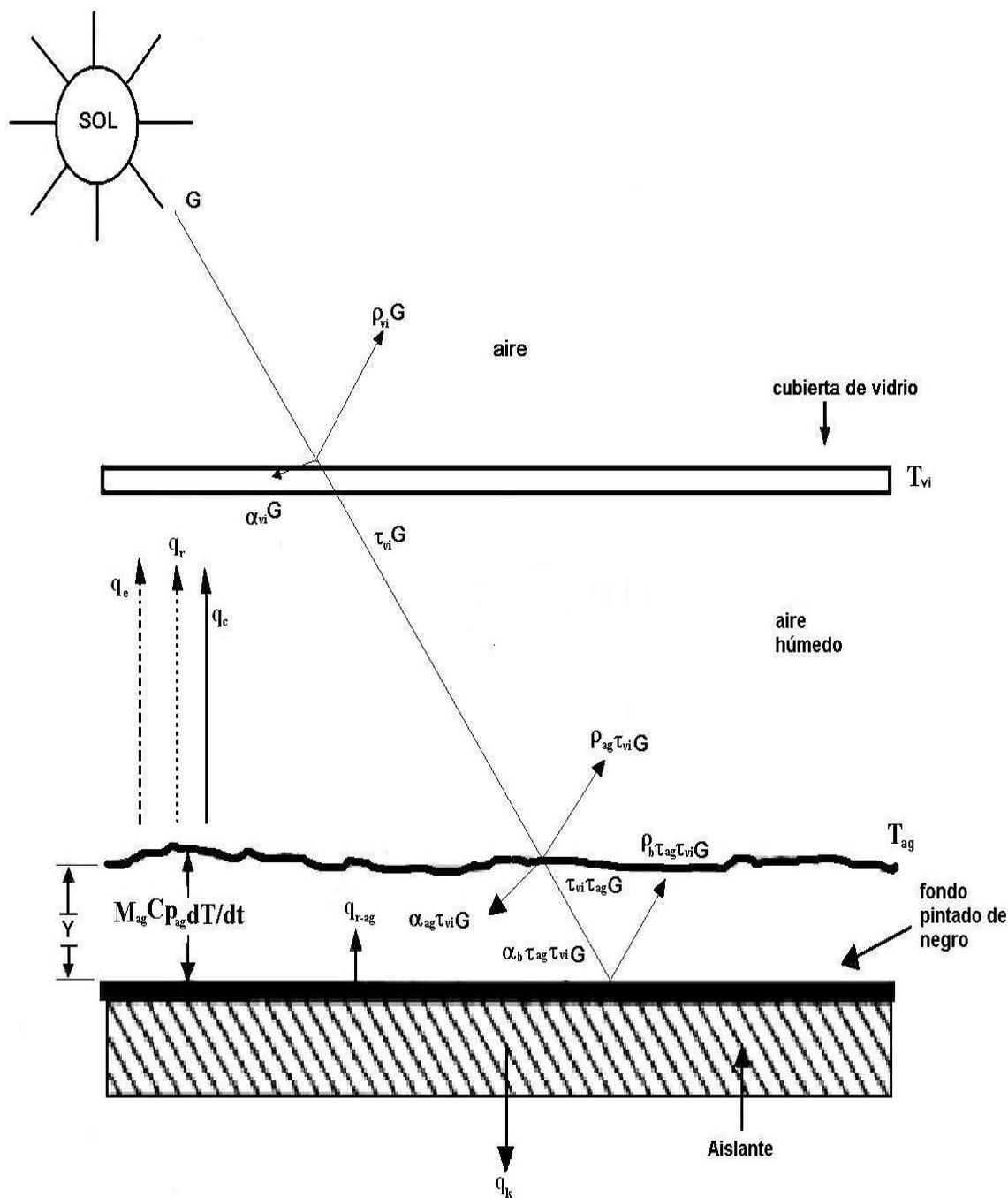


Figura 2.9: Fenómenos ópticos y térmicos en destiladores solares. (SARTORI, 1996)

Donde:

G : Radiación solar, $kW.h/m^2$

τ_{vi} : Transmitividad del vidrio

ρ_{ag} : Reflectividad del agua

α_{ag} : Absortividad del agua

α_b : Absortividad de la base del destilador

τ_{vi} : Transmitividad del agua

ρ_{vi} : Reflectividad del vidrio

2.19.1.- REFLECTANCIA ρ .— Es la fracción de la energía incidente en una superficie interfacial que es reflejada, está en función de los materiales que forman las fases y el ángulo de incidencia de la radiación en la medida que aumenta el ángulo, aumenta también la fracción reflejada hasta ser 1 en el ángulo denominado “reflexión total”

En las cubiertas transparentes de los destiladores la radiación cambia de medio refringente en dos locaciones (aire-vidrio y vidrio-aire), por lo que habrá dos reflexiones. Para el propósito del trabajo se consideró que la cubierta es lo suficientemente delgada como para que las dos radiaciones reflejadas sean como una sola (vidrio - aire).

2.19.2.- ABSORBANCIA (α) Y CUERPOS NEGROS.

La absorbancia es la fracción de energía incidente en la superficie de refringencia dada. La absorbancia está en función de la naturaleza, del medio transmisor, del grosor o espacio de interacción entre la luz y el material transmisor y de la longitud de onda de la radiación.

La absorbancia conocida también como absortividad (α) es una propiedad que determina la fracción de la irradiación absorbida por el material (cubierta de vidrio), en forma de calor, otra parte se refleja de regreso al espacio y otra se transmite a través del cuerpo.

La absorptividad depende de la distribución espectral de la radiación incidente, así como de su distribución direccional y de la naturaleza de la superficie de absorción. La absorptividad solar (α_s) de una superficie puede diferir de su emisividad ϵ , la razón α_s/ϵ debe ser lo más pequeña si la superficie está destinada a coleccionar energía solar. Los cuerpos idealmente negros son absorbentes de todas las radiaciones. Como en principio la energía no se destruye, la energía de la radiación absorbida es transformada a energía cinética a nivel molecular, la cual se manifiesta en un incremento de temperatura.

Un cuerpo negro se define como aquel que absorbe toda la energía radiante y no refleja esta energía absorbida, por lo que la reflectividad es cero $\rho = 0$, por lo tanto la absorptividad para un cuerpo negro es $\alpha=1$

Un cuerpo negro también transmite radiación dependiendo de su temperatura. La relación entre el poder de emisión de una superficie y el de un cuerpo negro se llama emisividad (ϵ), con $\epsilon = 1.0$ para un cuerpo negro.

Donde:

α = es la absorptividad o fracción absorbida

ρ = es la reflectividad o fracción reflejada

Los cuerpos opacos son aquellos cuerpos que impiden el paso de la luz a través de ellos o que no reflejan la luz.

Las sustancias que tienen emisividades inferiores a 1.0 reciben el nombre de cuerpos grises, todos los cuerpos reales tienen emisividades $\epsilon < 1.0$

2.19.3.- EMISIVIDAD (ϵ).

Es una propiedad radiativa de la superficie, 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.

También se puede definir como la razón de la radiación emitida por la superficie, a la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

La ecuación básica de transferencia de calor por radiación de un cuerpo negro perfecto $\epsilon = 1.0$ es:

$$q_{r,ag-vi} = A\sigma T^4 \quad (2.7)$$

Para un cuerpo no negro con emisividad $\epsilon < 1.0$, el poder de emisión de la ecuación (2.11) se reduce a un factor = $\epsilon\sigma$, es decir:

$$q_{r,ag-vi} = A\epsilon\sigma T^4 \quad (2.8)$$

Para dos cuerpos radiadores de igual geometría a temperaturas diferentes el calor transferido será:

$$q_{r,ag-vi} = \epsilon A (\sigma T_{ag}^4 - \sigma T_{vi}^4), \quad T_{ag} > T_{vi} \quad (2.9)$$

2.19.4.- TRANSMITANCIA.

Es la fracción de la potencia recibida que puede ser atravesada por la radiación electromagnética. Es función de la naturaleza del medio transmisor, del grosor del medio y de la longitud de onda de la radiación.

Únicamente el vacío es el mejor transmisor perfecto para todas las longitudes de onda.

Tabla 6.
*Propiedades Solares Radioactivas para Materiales Seleccionados para la
 Cubierta de Destiladores*

	Descripción /Composición	α_s	ϵ_b	$\alpha_s/$ ϵ	τ_s
1	Aluminio pulido	0.09	0.03	3.0	
	Anonadizo	0.14	0.89	0.1	
				7	
	Recubierto de cuarzo	0.11	0.37	0.3	
			0		
	Hoja	0.15	0.05	3.0	
2	Ladrillo rojo	0.63	0.93	0.6	
				8	
3	Concreto	0.60	0.88	0.6	
				8	
4	Hoja metálica galvanizada				
	Limpia , nueva	0.65	0.13	5.0	
	Oxidada, desgastada	0.80	0.28	2.9	
5	Vidrio, 3.2 mm de espesor				
	Aplanado o templado				0.79
	Tipo bajo en oxido de hierro				0.88
6	Metal plateado				
	Sulfuro negro	0.92	0.10	9.2	
	Oxido de cobre negro	0.93	0.03	3.1	
	Oxido de níquel negro	0.92	0.08	11	
	Zinc Negro	0.87	0.09	9.7	
7	Milar, 0.13mm de espesor				0.87
	Negro	0.98	0.98	1.0	
	Blanco Acrílico	0.26	0.90	0.29	
	Blanco oxidado de Cinc	0.16	0.93	0.17	
9	Plexiglas, 3.2 mm de espesor				0.90
10	Tedlar mm de espesor				0.92
11	Tedlar,0.13mm de espesor				0.92

Fuente: (F. Incropera, 2007)

El único transmisor perfecto para todas las longitudes de onda es el vacío. El vidrio y los plásticos son transparentes en las regiones ultravioleta, visible e infrarrojo que corresponden a las radiaciones producidas por los emisores calientes.

Los materiales que tienen estas características dan lugar al importante efecto invernadero. Éste consiste en que el material deja pasar la radiación visible al interior del dispositivo, donde es convertida en calor en superficies que emiten radiación infrarroja lejana, pero como la cubierta de estos dispositivos es opaca a éstas últimas, el calor queda encerrado en el interior del destilador.

La transmitividad es un factor que tiene un peso importante en la selección de los materiales de la placa cubierta de colectores solares.

2.20.- PLANTEAMIENTO DE ECUACIONES DE INTERCAMBIO TÉRMICO EN DESTILACIÓN SOLAR

La radiación solar incidente sobre la cubierta de vidrio de un destilador, está sujeta a la reflexión y absorción de la cubierta y por lo tanto de la superficie del agua.

La radiación solar en el agua a destilar, es transferida a la cubierta de vidrio por medio de un mecanismo de evaporación, radiación y convección. La absorción de energía en la base del destilador viene a ser la única ganancia de energía del sistema de destilación solar para elevar la temperatura del agua contenida en el destilador. Una pequeña parte de esta energía se pierde por conducción al fondo y a las paredes, otra parte es cedida al agua por convección. El calor ganado por el agua sufre tres fenómenos de transferencia de calor desde su superficie hasta la cubierta de vidrio.

El primero corresponde a la transferencia de calor por la convección interna del aire. El segundo es el que corresponde al calor latente de las moléculas de vapor que se condensan en

la parte interna de la cubierta, que corresponde a la cantidad de calor necesaria para evaporar el agua del destilador, generando un proceso de evaporación-condensación. El tercero es el cambio radiativo entre las superficies del destilador solar y la cubierta de vidrio ya que a las temperaturas de la operación, la radiación está entre los 2500 a 3000 nm y a esas longitudes el vidrio es opaco.

El calor cedido a la cubierta de vidrio por convección, evaporación-condensación y el de radiación desde la superficie del destilador solar, se transfiere a la atmósfera, debido a la convección del aire sobre la parte externa de la cubierta de vidrio, y a la emisión radiativa en las longitudes de onda en el infrarrojo hacia la atmósfera.

Para las ecuaciones de transferencia de calor del sistema, se asumió que el destilador solar está herméticamente cerrado, por lo que no hay fugas de vapor de agua ni de aire, la inercia térmica de la cubierta de vidrio y del fondo es despreciable.

A partir de las Figura 2.10 se deduce la expresión general del cálculo de la radiación solar en un destilador solar tipo caseta.

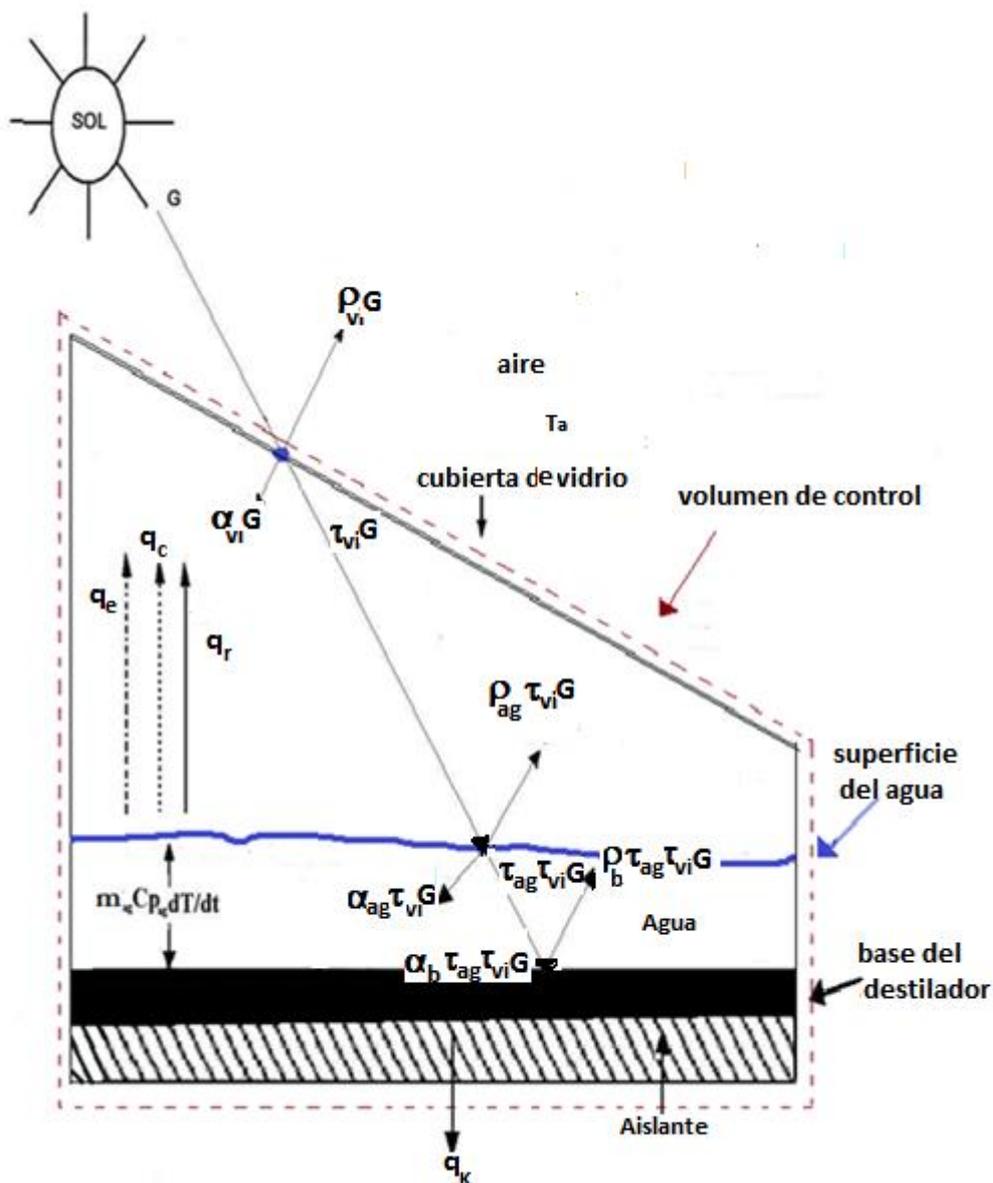


Figura 2.10: Esquema general en un destilador solar tipo caseta.

De la figura 2.10 se deduce el cálculo de la energía solar G , incidente en un destilador solar tipo caseta.

Para esto se toma en cuenta el Item 2.13 de los fenómenos ópticos y térmicos más relevante que ocurre en el destilador solar, definiéndose G .

G (radiación solar).- El prototipo del destilador solar aprovecha la radiación directa y difusa para poder llevar a cabo el proceso térmico de transferencia de calor y masa, para ello se realizó lo siguiente:

2.20.1.- CALCULO DE G EN LA SUPERFICIE DEL VIDRIO.

La radiación solar G al llegar a la cubierta del vidrio sufre reflexión, absorción y transmitancia por lo tanto la radiación que entra al destilador es:

$G(1 - \alpha_v)$ donde: α_v , es un factor que incluye la reflexión y la absorción de la radiación solar en el vidrio.

$$G - \rho_{vi}G - \alpha_{vi}G - G\tau_{vi} = 0 \quad (2.10)$$

$$G(1 - \rho_{vi} - \alpha_{vi}) = G\tau_{vi} \quad \text{si} \quad (\rho_{vi} - \alpha_{vi}) = \alpha_v$$

$$G\tau_{vi} = G(1 - \alpha_v)$$

2.20.2.- CALCULO DE G EN LA SUPERFICIE DEL AGUA.

La radiación que ingresa por transmitancia del vidrio al destilador choca contra la superficie del agua, en la que una parte de la radiación es reflejada, otra parte de la radiación es absorbida y la mayor parte de la radiación es transmitida a la base pintada de negro del destilador, donde se deposita el agua salobre a destilar, siendo esta: $G(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a)$ donde α_a es un factor que incluye la reflexión y absorción por el agua y la absorción por la base del destilador.

Para un cuerpo negro (base del destilador) se asume que: un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la energía radiante y no refleja energía radiante alguna de la base del destilador, por eso para un cuerpo negro $\rho=0$ y $\alpha=1$, demostrándose a partir de las siguientes ecuaciones.

Calculo de la energía radiante en la superficie del agua.

$$G\tau_{vi} - G\tau_{vi}\rho_{ag} - G\tau_{vi}\alpha_{ag} - G\tau_{vi}\tau_{ag} = 0 \quad (2.11)$$

$$G(1 - \rho_{ag} - \alpha_{ag}) = G\tau_{vi}\tau_{ag} \quad \text{si} \quad (\rho_{ag} - \alpha_{ag}) = \alpha_a$$

$$G(1 - \alpha_a) = G\tau_{vi}\tau_{ag}$$

Calculo de la energía radiante en la base del destilador pintada de negro

$$G\tau_{vi}\tau_{ag} - G\tau_{vi}\tau_{ag}\rho_b - G\tau_{vi}\tau_{ag}\alpha_b = 0 \quad (2.12)$$

Para un cuerpo negro $\rho_b=0$, entonces se tiene:

$$G\tau_{vi}\tau_{ag} - G\tau_{vi}\tau_{ag}\alpha_b = 0, \quad G\tau_{vi}\tau_{ag} = G\tau_{vi}\tau_{ag}\alpha_b \quad \text{y} \quad \alpha_b = 1$$

Por tanto a través de las ecuaciones de cálculo de la radiación solar G , que incide desde la cubierta de vidrio hasta la base del destilador solar se deduce a lo siguiente:

$$G = G(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a) \quad (2.13)$$

Donde:

α_v un factor que incluye la reflexión y la absorción de la radiación solar en el vidrio.

α_a un factor que incluye la reflexión y absorción por el agua salobre y la absorción por la base del prototipo del destilador.

Los valores de α_v y α_a son 0.1 y 0.3 respectivamente. [COOPER, 1972]

Los cuales seran tomados en cuenta en las ecuaciones de calculo de calor en el prototipo del destilador solar.

Balance de energía en el sistema de destilación solar.

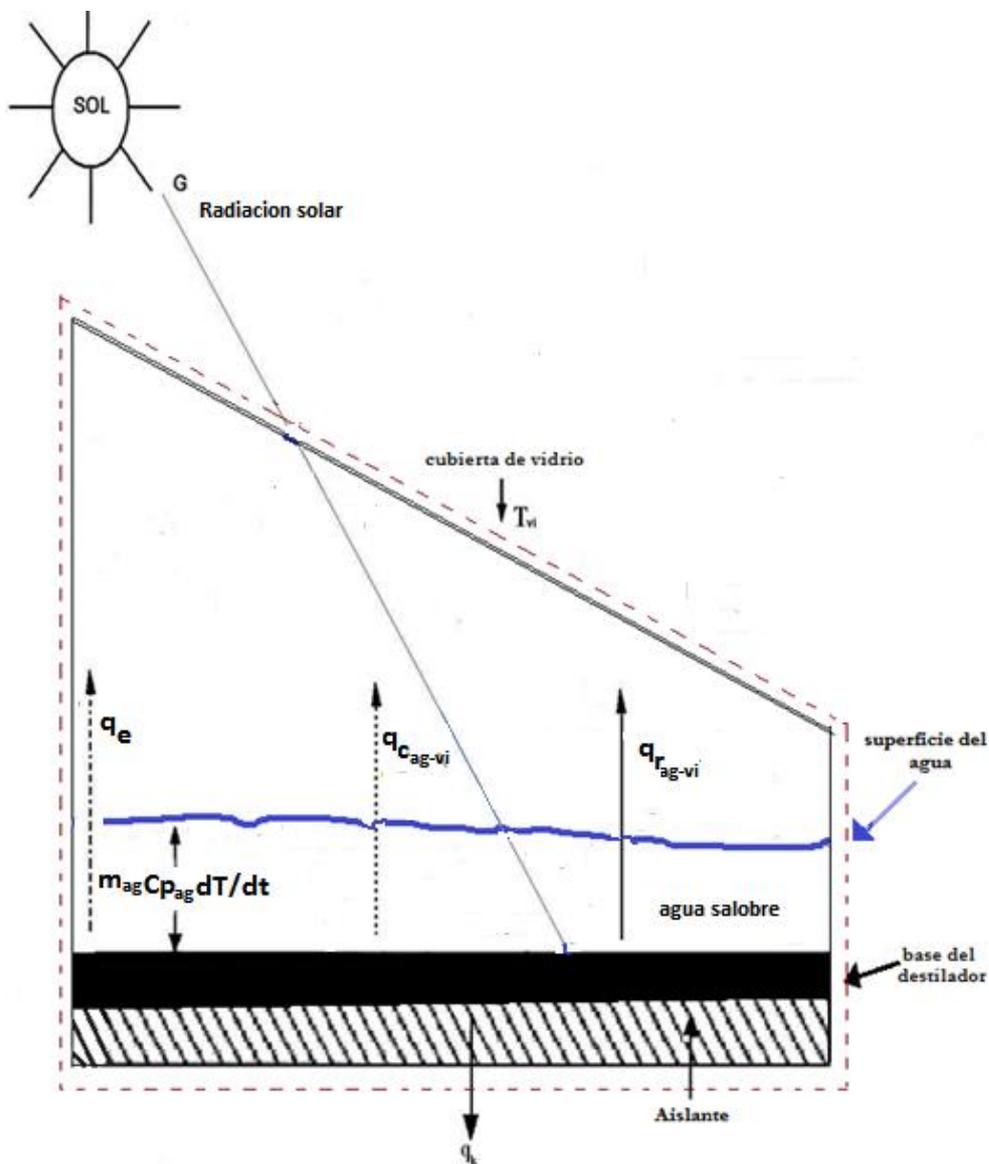


Figura 2.11: Sistema de destilación solar

BALANCE DE ENERGIA EN EL SISTEMA DE DESTILACION SOLAR

Flujo de energía que entra - Flujo de energía que sale = acumulación

$$AG - q_{r,ag-vi} - q_{c,ag-vi} - q_e - q_k = (mC_p)_{ag} \frac{dT}{dt}$$

Ordenando y dividiendo entre el área se tiene:

$$G = \frac{q_{r_{ag-vi}}}{A} + \frac{q_{c_{ag-vi}}}{A} + \frac{q_e}{A} + \frac{q_k}{A} + \frac{(mC_p)_{ag} dT}{A dt} \quad (2.14)$$

(Beckman, 1980).

Donde:

$\frac{q_{r_{ag-vi}}}{A}$: Flujo de calor por radiación desde el agua a la cubierta de vidrio, W/m^2

$\frac{q_{c_{ag-vi}}}{A}$: Flujo de calor por convección desde el agua a la cubierta de vidrio, W/m^2

$\frac{q_e}{A}$: Flujo de calor por evaporación – condensación desde el agua a la cubierta de vidrio,
 W/m^2

$\frac{q_k}{A}$: Flujo de calor perdido por los costados y base del destilador, W/m^2

$\frac{(mC_p)_{ag} dT}{A dt}$: Calor ganado por el agua en el destilador en un tiempo determinado, W/m^2

G : Radiación solar incidente total sobre la cubierta del destilador solar, W/m^2

El balance de energía se realiza en el sistema por tanto los procesos de transferencia de calor, así como la acumulación se da en el área del prototipo del destilador solar.

2.20.3.- FLUJO DE CALOR POR RADIACIÓN DESDE EL AGUA HASTA LA CUBIERTA DE VIDRIO $q_{r_{ag-vi}}$.

Para el prototipo del destilador solar tipo caseta el área del vidrio y del agua a destilar se considera paralelas, así como se encuentra a una distancia pequeña y las emisividades del vidrio como del agua son diferentes, por lo tanto el flujo de calor por radiación está dado por:

$$q_{r_{vi-}} = \sigma \epsilon_{vi} A_{vi} (T_{ag}^4 - T_{vi}^4) \quad (2.15)$$

$$q_{r,ag} = \sigma \epsilon_{ag} A_{ag} (T_{ag}^4 - T_{vi}^4) \quad (2.16)$$

σ : Constante de Stefan Boltzmann 5.67×10^{-8} , $W/m^2 \text{ } ^\circ K^4$

ϵ_{vi} : Emisividad del vidrio

ϵ_{ag} : Emisividad del agua

A_{vi} : Área del vidrio, m^2

A_{ag} : Área de la superficie de agua a destilar, m^2

Como el área de la base del destilador y de la cubierta de vidrio se considera la misma, se tiene:

$$A_{vi} = A_{ag} \quad (2.17)$$

Para espesores mayores a 0.1 mm de la cubierta de vidrio (Meinel, 1987), plantea que $\epsilon_{ag} = 0.957$ y $\epsilon_{vi} = 0.94$

$$\epsilon_{ag-vi} = 1 \quad (2.18)$$

Por tanto la transferencia de calor por radiación en el destilador solar de emisividades diferentes está dado por:

$$q_{r,ag-vi} = \sigma A \frac{(T_{ag}^4 - T_{vi}^4)}{\left[\left(\frac{1}{\epsilon_{ag}} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{vi}} \right) - 1 \right]} \quad (2.19)$$

Reemplazando las emisividades de vidrio, agua y la constante de Stefan-Boltzmann en (2.22), se obtiene

$$q_{r,ag-vi} = 5.1084 \times 10^{-8} A (T_{ag}^4 - T_{vi}^4) \quad (2.20)$$

2.20.4.- FLUJO DE CALOR POR CONVECCIÓN DESDE EL AGUA HASTA LA CUBIERTA DE VIDRIO: $q_{c,ag-vi}$

Cuando el destilador solar esta en operación, el agua a destilar se calienta y empieza a evaporarse elevándose hacia la cubierta de vidrio.

Este fenómeno da lugar a que en el interior del destilador, que inicialmente contenía solo aire a la presión atmosférica, haya una mezcla de aire y vapor de agua, también a la presión atmosférica.

La transferencia de calor por convección de la mezcla aire – vapor de agua, de la superficie del líquido a la cubierta de vidrio esta dado por:

$$\frac{q_{c,ag-vi}}{A} = h'_c \Delta T \quad (2.21)$$

En donde:

$h'_c =$ coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2\text{ }^\circ C$

$\Delta T =$ Diferencia de temperatura entre el agua y el vidrio, $^\circ C$

La diferencia de temperaturas entre la T_{ag} y la T_{vi} en el destilador solar esta dada por:

$$\Delta T = (T_{ag} - T_{vi}) + \left[\frac{P_{ag} - P_{vi}}{2016 - P_{ag}} \right] T_{ag} \quad (2.22)$$

(Beckman, 1980, pág. 660).

El coeficiente de transferencia de calor por convección natural esta dado por:

$$h'_c = 0.884 \left[(T_{ag} - T_{vi}) + \left(\frac{P_{ag} - P_{vi}}{2016 - P_{ag}} \right) T_{ag} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.23)$$

(Beckman, 1980)

Donde:

p_{ag} = presión de vapor del agua a la temperatura del agua en mmHg

p_{vi} = presión de vapor del agua a la temperatura del vidrio en mmHg

$T = ^\circ K$

Por tanto la transferencia de calor por convección desde el agua a la cubierta de vidrio, esta dada por:

$$q_{c.ag-vi} = 0.884 \left[(T_{ag} - T_{vi}) + \left(\frac{p_{ag} - p_{vi}}{2016 - p_{ag}} \right) T_{ag} \right]^{\frac{1}{3}} (T_{ag} - T_{vi}) A \quad (2.24)$$

(Beckman, 1980)

2.20.5.- FLUJO DE CALOR POR EVAPORACIÓN –CONDENSACIÓN: q_e .

Por analogía entre la velocidad de transferencia de calor y masa, la transferencia de masa se puede escribir así:

$$m_d = 9.15 \times 10^{-7} h'_c (P_{ag} - P_{vi}) \quad (2.25)$$

(Beckman, 1980, pág. 660)

Entonces el flujo de calor por evaporación es:

$$q_e = 9.15 \times 10^{-7} h'_c A (P_{ag} - P_{vi}) h_{fg} \quad (2.26)$$

(Beckman, 1980, pág. 660)

Donde:

h_{fg} = calor latente de vaporización del agua, J/kg

$m_d =$ flujo de transferencia del condensado, $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$

2.20.6.- FLUJO DE CALOR POR CONVECCIÓN DESDE LA CUBIERTA DE VIDRIO AL AIRE: $q_{c,ve-a}$

$$q_{c,ve-a} = h_v (T_{ve} - T_a) A \quad (2.27)$$

Donde:

$h_v =$ coeficiente de convección que depende de la velocidad del viento, W/m^2

Se recomienda la siguiente ecuación para el coeficiente de convección que depende de la velocidad del viento:

$$h_v = 5.7 + 3.8v \quad (2.28)$$

(Beckman, 1980, pág. 174)

Donde:

$v =$ velocidad del viento, m/s

Reemplazando la ecuación (2.28) en la ecuación (2.27), se obtiene:

$$q_{c,ve-a} = (5.7 + 3.8v)(T_{ve} - T_a) A \quad (2.29)$$

2.20.7.- FLUJO DE CALOR POR RADIACIÓN DESDE LA CUBIERTA DE VIDRIO AL AIRE. $q_{r,ve-a}$

$$q_{r,ve-a} = 4.189 \times 10^{-8} (T_{ve}^4 - 9.284 \times 10^{-6} T_a^6) A \quad (2.30)$$

Donde:

$T_a =$ temperatura del aire, $^{\circ}K$

2.20.8.- CANTIDAD DE CALOR NECESARIO PARA EVAPORAR EL AGUA.

$$Q_{evaporar, agua} = x * m_{ag} * \lambda \quad (2.31)$$

Donde:

x : Fracción de agua a evaporar

λ : Calor latente de evaporación del agua.

2.20.9.- CANTIDAD DE CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL AGUA.

$$Q_{calentar, agua} = m_{agua} * C_{p_{agua}} (T_{ag} - T_a) \quad (2.32)$$

2.21.10.- CANTIDAD DE CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL VIDRIO.

$$Q_{calentar, vidrio} = m_{vi} * C_{p_{vi}} (T_{vi} - T_a) \quad (2.33)$$

Donde:

m_{vi} = masa del vidrio

$$C_{p_{vi}} = \text{capacidad calorífica del vidrio} = \frac{750 \text{ J}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$$

2.20.11.- CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL VIDRIO Y EVAPORAR EL AGUA

$$Q_{necesario} = Q_{calentar, vidrio} + Q_{calentar, agua} + Q_{evaporar, agua} \quad (2.34)$$

2.20.12.- FLUJO DE CALOR ABSORBIDO POR EL SISTEMA.

Calor almacenado en el interior del prototipo del destilador solar por el agua y la base

$$Q_{abs.int} = (G * (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a)) - (q_e + q_{c, ag-vi} + q_{r, ag-vi} + q_k) \quad (2.35)$$

Calor almacenado por la cubierta de vidrio.

$$Q_{abs.ext} = (q_e + q_{c,ag-vi} + q_{r,ag-vi} + (G * \alpha_v)) - (q_{r,ve-a} + q_{c,ve-a}) \quad (2.36)$$

Por lo tanto el flujo de calor absorbido por el sistema es:

$$Q_{abs.sist.} = Q_{abs.int} + Q_{abs.ext}$$

$$Q_{abs.sist.} = (G * (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a)) + (G * \alpha_v) - (q_{r,ve-a} + q_{c,ve-a}) \quad (2.37)$$

2.20.13.- CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL SISTEMA DE DESTILACION SOLAR.

La intensidad de la energía solar que cae sobre el prototipo del destilador es el parámetro más importante que afecta la producción de agua en el prototipo del destilador solar. La cantidad de agua purificada producida es la cantidad de energía utilizada en la vaporización del agua en el destilador sobre el calor latente de vaporización del agua.

$$\eta_{térmica} = \frac{Q_{almacenado,sistema}}{G * \alpha_v} * 100 \quad (2.38)$$

2.20.14.- CÁLCULO DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES EN EL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR

La eficiencia de datos experimentales esta dada por la ecuación de (Beckman, 1980, pág. 661)

$$\eta_i = \frac{m_d * h_{fg}}{G * A} \quad (2.39)$$

Donde:

$G =$ Radiación solar Promedio por hora; kJ/m^2

$A = \text{Área del prototipo del destilador solar: } 0.15 \text{ m}^2$

$m_d = \text{Masa del destilado; kg}$

$h_{fg} = \text{Calor latente de vaporización del agua: kJ/kg}$

$\eta_i = \text{Eficiencia experimental del equipo.}$

2.20.15.- AGUAS SALOBRES DE LA LOCALIDAD DE MARAS.

El objetivo del trabajo es construir y evaluar un prototipo de destilador solar, que permita obtener agua para consumo humano a partir de aguas salobres en la ciudad del Cusco, el agua salobre utilizada en la experimentación fue del distrito de Maras específicamente de la salinera de Maras.

la producción de agua purificada apta para consumo humano será, para abastecer a zonas rurales donde no existen unidades básicas de saneamiento, como es el caso de comunidades de la provincia de Urubamba comunidades en las que según el padrón de beneficiarios mencionados en el proyecto “Ampliación y mejoramiento de los servicios de agua potable, alcantarillado y unidades básicas de saneamiento en las localidades de la comunidad campesina de pachar- chulluracay, distrito de ollantaytambo, provincia urubamba - Cusco” de 280 familias con una densidad familiar de 4 miembros, solo el 66% de la población cuentan con accesibilidad a este servicio, mientras el 32% no cuenta con el servicio abasteciéndose de manantes y de agua del río.

De acuerdo a (Guadalupe G., 2012), se puede deducir que las fuentes de agua no potables existentes en la ciudad de Urubamba, tienen en su mayoría componentes similares por la composición del suelo que pertenecen a la formación Maras.

2.20.16.- GEOLOGIA GENERAL DE LA LOCALIDAD DE MARAS.

La provincia de Urubamba pertenece a la formación Maras. Según la Carta Geológica Nacional, regionalmente la localidad de Maras aflora la Formación Maras como parte del Grupo Yuncaypata, ésta yace concordantemente a la Formación Paucarbamba, en la que su composición del suelo es una mezcla de yesos, lutitas y escasas calizas (Guadalupe G., 2012)

2.20.16.- CONSUMO PROMEDIO DE AGUA POTABLE POR HABITANTE.

La organización mundial de la salud, estableció una guía para determinar la cantidad de agua necesaria para cada ser humano.

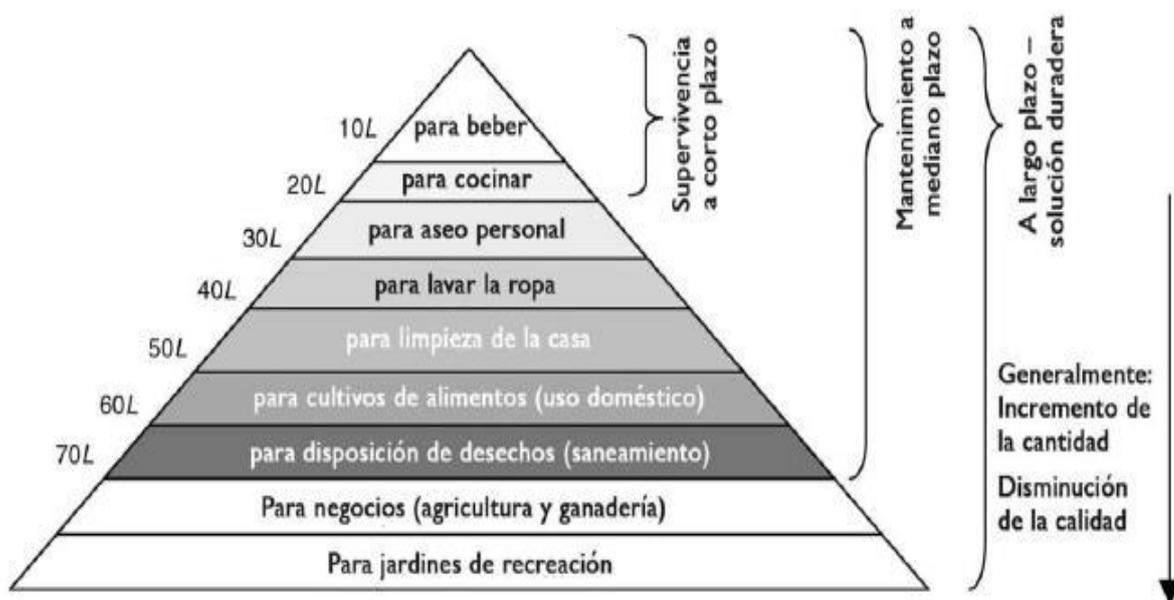


Figura 22: Consumo doméstico del agua 2009.

Fuente: [ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS); ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS/OMS).

2009]

2.20.17.-CANTIDAD PROMEDIO DE HABITANTES POR VIVIENDA.

Se considero la cantidad promedio de habitantes por vivienda de 4 personas.

En la tabla N 4, se puede apreciar la necesidad básica de consumo de agua requerida para una persona [O.M.S, 2009].

Tabla 7.

Cantidad Minima de Agua

Cuota	Litros de Agua Diaria	Necesidad
Cuota mínima de supervivencia	7 litros de agua diaria por persona.	Para beber 3 a 4 litros por persona. Para preparación de comida 2 a 3 litros por persona. Para beber 3 a 4 litros por persona.
Cuota a mediano plazo	15 a 20 litros de agua diaria por persona.	Para preparación de comida 2 a 3 litros por persona.
		Para higiene personal 6 a 7 litros diarios por persona. Para lavado de ropa 4 a 6 litros diarios por persona.

Fuente: Organización mundial de la salud (OMS); Organización panamericana de la salud (OPS/OMS). Consumo doméstico del agua. 2009.

Tomando en cuenta que la función del prototipo del destilador solar es abastecer la necesidad de agua purificada para una familia de 4 personas, dentro de las necesidades se tiene en cuenta la preparación de alimentos y el aseo personal con buenas prácticas de ahorro.

$$\text{consumo familiar} = 4 * 7L$$

$$\text{consumo familiar} = 28L/di$$

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS.

3.1. - MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1.- MATERIALES.

La selección de materiales para la construcción del prototipo del destilador solar se determinó tomando en cuenta las propiedades, y disponibilidad de los materiales escogidos para la construcción del prototipo. El prototipo se construyó en el taller de INDUSTRIAS EDISUR S.C.R.L. del distrito de Wanchaq - Cusco.

Siendo los materiales seleccionados:

- Dos planchas de acero inoxidable para la construcción del prototipo del destilador solar y el canal de recolección. Se eligió el acero inoxidable por sus propiedades higiénicas, su alta resistencia a la corrosión y mayor absorbancia de energía solar.
- Una lámina de vidrio de 4 mm de espesor para la cubierta del prototipo, se escogió este material, para que el condensado se distribuya como película homogénea sobre el área del vidrio, en cambio en las cubiertas de plástico el condensado se forma en gotas que reflejan y dispersan parte de la radiación incidente.
- Dos tubos de cobre de 1 cm de diámetro, para la alimentación y recolección del destilado, se seleccionó este material por ser resistente a la corrosión y temperaturas altas.
- 1 octavo de galón de pintura negra epoxide hs, para una mejor absorción de la radiación solar. La pintura Epoxide hs es un producto formulado con bajo tenor de compuestos orgánicos volátiles apta para el pintado interno de tanques de agua

potable y recomendado para revestimiento interno de tanques de agua salada, además de tener excelente resistencia química a la corrosión.

[www.sherwinindustria.com.ar]

- Dos bisagras
- Material hermético para la cubierta
- Una plancha de material aislante.
- Pegamento epóxido para vidrio metal.
- Envase de 5 galones para trasladar agua salobre de la localidad de Maras
- Envases de vidrio esterilizado, para almacenar el agua purificada
- Probeta de 500 ml de capacidad para medir el volúmen del agua purificada.

3.1.2.- EQUIPO.

El equipo utilizado en el sistema de destilación solar fue, el Dataloger Multi log Pro, con el cual se midió las temperaturas dentro y fuera del prototipo del destilador solar, los datos de temperatura que se utilizaron en los cálculos del balance de energía y eficiencia térmica del prototipo.

3.1.2.1.- CARACTERÍSTICAS DEL MULTI LOG PRO (RECOLECTOR DE DATOS)

Es un equipo (recolector) portátil de tamaño de bolsillo puede usarse tanto en el laboratorio como en exteriores. El poder de tomar miles de muestras por segundo ahorra el tiempo requerido en recolectar mediciones del experimento y libera a la persona para trabajar con el análisis de datos. El análisis de las mediciones se realiza utilizando el software MultiLab, ofreciendo un módulo de video único y más de 30 funciones matemáticas y herramientas. En el laboratorio el MultiLogPRO puede conectarse directamente al puerto serial del PC, trabajando como una interfase rápida en-línea. El MultiLogPRO con su gran memoria es

también la mejor elección para actividades de campo en Biología y Ciencias Ambientales. Los estudiantes pueden realizar y almacenar hasta 100 experimentos distintos antes de tener que descargarlos.

Características

- **Es Potente.**

El sistema MultiLogPRO cuenta con 65 sensores para usos científicos diversos. Puede grabar datos de 8 sensores diferentes simultáneamente. El Multilog PRO permite contar con una sola herramienta para experimentos de Física, Biología, Química y Ciencias Ambientales, entre otras. La programación del MultiLog PRO se hace usando un teclado de sólo "4 teclas". Su menú basado en íconos es claro y simple. El MultiLogPRO se conecta a todo PC, sin necesidad de tarjetas especiales. El MultiLogPRO identifica automáticamente el sensor y calibra el desbalance, haciendo que la programación del experimento sea tan sencilla.

1. Conecte el sensor
2. Seleccione el ritmo de muestreo
3. listo

- **Pantalla gráfica**

El MultiLogPRO tiene una pantalla grafica para ver datos en-línea a través de diversas presentaciones que incluyen gráficas, tablas y medidores. Puede analizar los datos recolectados ubicando marcadores sobre la ventana gráfica para tomar mediciones precisas. El sistema le permite leer las notas del experimento.

- **Es Rápido**

El MultiLog PRO puede hacer mediciones a una velocidad de hasta 20,800 muestras por segundo (crítico para experimentos de electricidad o sonido). Especificar un experimento usando el MultiLog PRO lleva segundos.

- **Es Portátil**

El MultiLog PRO funciona ya sea conectado al PC o como un dispositivo independiente. Los experimentos pueden programarse usando el teclado incorporado. El MultiLog PRO, de 450 grs., puede grabar 200 horas de datos y su memoria acumula más de 100,000 muestras. Una batería recargable interna de 7.2V le ahorra la necesidad de su constante reemplazo. El MultiLog Pro puede trabajar en conjunto con la calculadora gráfica de Texas Instruments.

- **Gran variedad de sensores**

Con los sensores de ITP el operador puede conducir casi cualquier experimento en las áreas de Biología, Física, Química y Ecología. ITP provee más de 65 sensores de alto rendimiento y mediciones de alta precisión con una gran variedad de parámetros



Figura 3.1: Multi Log Pro.

3.2.- METODOS.

3.2.1.- ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

Para iniciar con los cálculos de diseño del prototipo del destilador solar, se decidió que el área sea de 0.15 m^2 por ser este un equipo experimental, las dimensiones correspondientes para este área son de 50 cm de largo por 30 cm de ancho y 20 cm de alto.

Elegido el área del equipo se procedió a calcular los parámetros internos del prototipo del destilador solar tales como: el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, la altura del nivel de agua a destilar

3.2.2.- MÉTODO PARA DETERMINAR EL ÁNGULO DE INCLINACION DE LA CUBIERTA DE VIDRIO

3.2.2.1- ORIENTACIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA CUBIERTA DE VIDRIO

El prototipo del destilador solar debe estar orientado con su eje longitudinal en dirección este - oeste y su inclinación depende de la época del año y de la latitud del lugar de instalación.

La instalación óptima del destilador solar se puede determinar en función del ángulo de declinación mensual del sol y de la latitud [VALERA, 1993].

Respecto a la latitud de la zona se presume un valor positivo, para el Hemisferio Norte y negativo para el Hemisferio Sur.

El ángulo de declinación del sol es aquel ángulo entre la dirección tierra – sol y el plano ecuatorial de la tierra.

Los ángulos de declinación medios mensuales aparecen en la tabla siguiente:

Tabla 9

Ángulos de Declinación Medios Mensuales.

Mes	Ángulos
Enero	-21°08''
Febrero	-13°13''
Marzo	-14°7'
Abril	-9°55'
Mayop	-19°05'
Junio	-23°20'
Julio	-21°23'
Agosto	-13°46'
Setiembre	-2°53'
Octubre	-8°51'
Noviembre	-18°36'
Diciembre	-23°19'

Fuente: [Valera, 1993]

Las ecuaciones que se utilizan para el cálculo del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio son:

$$\alpha = \phi - \sigma \quad (\text{Hemisferio Norte}) \quad (3.1)$$

$$\alpha = \delta - \phi \quad (\text{Hemisferio Sur}) \quad (3.2)$$

$$\alpha = \varphi \alpha = \varphi - \sigma - \sigma$$

$$\alpha = \delta - \phi$$

Donde:

α : *Ángulo de inclinación de la cubierta del destilador solar.*

ϕ : *Latitud de la zona de instalación.*

δ : *Ángulo de declinación medio mensual del sol.*

El prototipo del destilador solar será utilizado durante todo el año, entonces el ángulo de declinación medio mensual no se considera es decir:

$$\delta = 0$$

El ángulo de inclinación de la cubierta del destilador solar se determina, empleando el valor de la latitud de la ciudad de funcionamiento del equipo (Cusco), por lo cual se utiliza la ecuación (3.2), por encontrarse la ciudad de funcionamiento en el Hemisferio Sur.

El valor de la latitud de la ciudad del Cusco es de: $\phi = -13^{\circ}19'10''$ [SENAMHI, 2009].

Reemplazando el valor de la latitud se tiene:

$$\alpha = \delta - \phi \tag{3.3}$$

$$\alpha = 0 - (-13^{\circ}19'10'') = 13^{\circ}19'10''$$

$$\alpha = 13^{\circ}19'10''$$

Cuando se utiliza el destilador solar durante todo el año, se puede aumentar en 10° el ángulo óptimo de inclinación, para compensar los meses de menor radiación solar incipiente.

[ANTONINHO, MARCAL Y MARQUEZ, 1991]

Se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para elegir un ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio respecto al destilador.

El ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio debe ser tal, que permita fluir la mayor cantidad del condensado hasta el canal de recolección, sin que nada caiga a la salmuera, además se debe elegir un ángulo de inclinación que no aumente la sombra de la superficie interior del prototipo del destilador solar.

3.2.2.2.- PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR EL ÁNGULO DE INCLINACION DE LA CUBIERTA DE VIDRIO

Se realizó 4 pruebas experimentales para determinar el ángulo de inclinación de la cubierta del prototipo del destilador solar, las que consistieron en evaporar 1.5 L de agua en un recipiente de vidrio, este recipiente se acomodó con una cubierta de vidrio de 3 mm de espesor en el cual se podía modificar el ángulo de inclinación, iniciándose la primera prueba con el ángulo de inclinación de acuerdo a la latitud de la ciudad del Cusco que es de 13°.

La energía utilizada para la evaporación fue una cocina eléctrica. El tiempo de experimentación para todas las pruebas fue de 30 minutos. Los resultados se muestran en el capítulo IV de resultados.

Tabla 10.

Pruebas Experimentales Para La Elección del Ángulo de Inclinación de la Cubierta de Vidrio.

Angulo de inclinación	13°	14.5°	17°	19°
Volumén de condensado				

Elaboración propia.

3.2.3.- ALTURA DEL NIVEL DE AGUA A DESTILAR.

La altura del nivel de agua salobre dentro del prototipo a purificar se determino, tomando en cuenta aportes bibliográficos de: Garcia, (1999), y al curso de Iteso sobre energía solar (1995), donde recomiendan que la altura del nivel de agua a destilar debe estar entre 5 cm y 8 cm, con el objeto de que el agua salobre a destilar alcance temperaturas relativamente altas (del orden de 60⁰C - 75⁰C), por lo tanto es necesario que el nivel del agua salobre en el evaporador sea pequeña, ya que las temperaturas altas favorecen el proceso de evaporación al aumentar exponencialmente la presión de vapor del agua. Sin embargo, en los destiladores de caseta es posible evaporar alrededor de 0.5 cm a 1 cm de profundidad de agua en un día. Debido a esto, no es recomendable que la profundidad sea menor que esta altura, para evitar que se seque el evaporador.

Por tanto, se eligió que el nivel del agua en el prototipo del destilador, sea de 5 cm en concordancia con la recomendación bibliográfica.

Es importante tomar en cuenta que, para el proceso de difusión molecular, la distancia es un elemento de resistencia al transporte de las moléculas de vapor de agua, por lo cual la distancia que separa al evaporador del condensador debe ser pequeña para evitar los efectos por acumulación térmica. Con esta recomendación se considero que la distancia entre el evaporador y el condensador sea de 15 cm en la parte alta y de 10 cm en la parte baja.

3.2.4.- CÁLCULO DEL VOLUMÉN DE CARGA DE ALIMENTACIÓN AL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR.

El volumen de carga de alimentación al prototipo del destilador solar se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$V = Ah$$

(3.4)

h : altura de la masa de agua a destilar, m

A : área del prototipo del prototipo del destilador solar, m^2

$$V = 0.15m^2 \times 0.05m$$

$$V = 0.0075m^3 = 7.5L$$

Por tanto, el volumen de carga de alimentación al prototipo del destilador solar por día de operación será de 7.5 L de agua salobre.

3.2.5.- CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR.

El objetivo del presente trabajo de investigación es construir y evaluar un prototipo de destilador solar que permita obtener agua para consumo humano a partir de aguas salobres. De acuerdo a la figura. 3.2, el prototipo de destilador solar tiene como dimensiones un área de 0,15 m^2 , de 30 cm de ancho, 20 y 15 cm de altura respectivamente y 50 cm de logitud, la cual esta compuesta por el evaporador en acero inoxidable y una cubierta de vidrio inclinada con un ángulo de 17° .

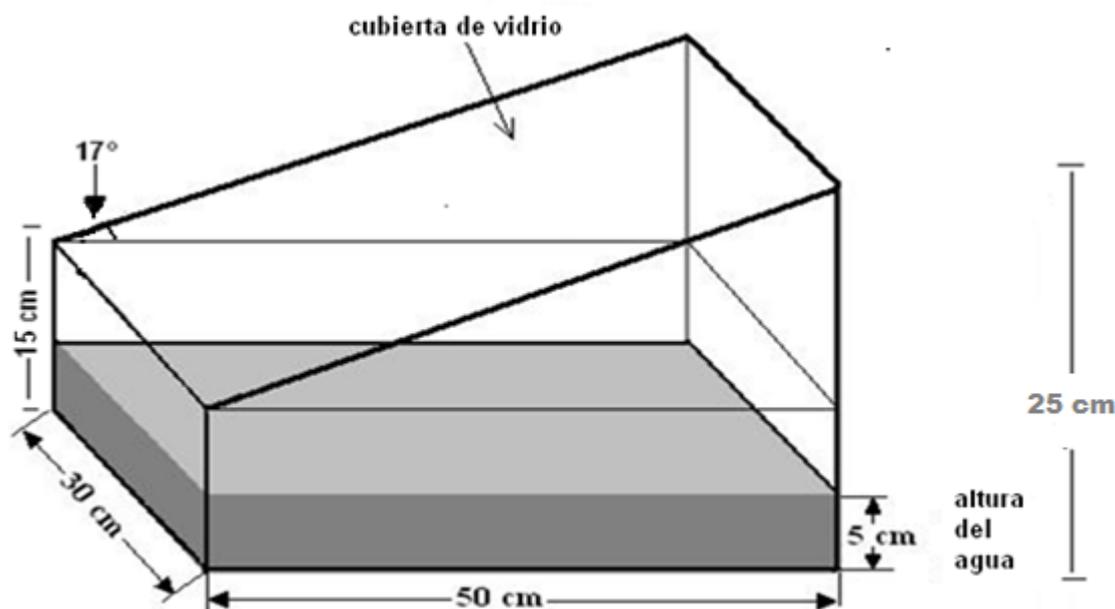


Figura 3.2.: Esquema del prototipo del sistema de destilación solar.

El prototipo se construyó tomando en cuenta también la distancia de la base del destilador a la cubierta de vidrio. Esta distancia tiene que ser pequeña para obtener resistencia térmica

baja y alcanzar altas temperaturas del agua en la superficie obteniendo una mayor producción de agua para consumo humano.

3.2.6.- FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.

El prototipo del destilador solar construido, tal como se muestra en la Figura 3.2, ha sido alimentado con un volumen de 7.5 L de agua salobre. En total se realizaron 22 experiencias de las cuales, 11 pruebas se realizaron en el mes de agosto y 11 pruebas en el mes de setiembre del 2010, las experiencias se realizaron con agua salobre traída de la localidad de Maras, Las muestras de agua salobre de la localidad de Maras, se obtuvieron de la fuente de agua que posee la salinera de Maras, para lo cual se viajó a dicho lugar y se muestreo de acuerdo al protocolo de muestreo de agua para análisis fisicoquímico.

Las pruebas experimentales se realizaron en la ciudad del Cusco, Distrito de Wanchaq, las experiencias se iniciaron a partir de las 9:00 horas hasta las 17:00 horas. Periodo de tiempo en el que se dispone de la radiación solar mas intensa, llevándose a cabo el monitoreo de los siguientes parámetros como: Temperatura ambiente (T_a), Temperatura del vidrio en el área externa (T_{ve}), Temperatura del vidrio en el área interna (T_{vi}), Temperatura del aire en el interior del destilador (T_{ai}), Temperatura del agua en el destilador (T_{ag}), Temperatura en la parte externa de la base del destilador (T_b), Temperatura en la parte externa del costado del destilador (T_c), Temperatura en la pared interna del destilador (T_{pi}) y la cantidad de la masa de producción de agua purificada. Los parámetros de temperaturas antes mencionados medidos en todo el proceso de purificación de aguas salobres se utilizó para desarrollar el balance de energía y la eficiencia térmica del prototipo del destilador solar, con la finalidad de determinar la cantidad de energía necesaria para evaporar la cantidad del producto purificado, con las ecuaciones desarrolladas en el capítulo II de intercambio térmico.

Las ecuaciones descritas en el capítulo II ítem 2.13 y 2.14 del presente trabajo de investigación, están directamente relacionadas con el proceso que ocurre en el prototipo del destilador solar en la producción de agua purificada a partir de aguas salobres. Los resultados de los flujos de calor calculados así como la cantidad de calor absorbido necesario para calentar, evaporar y condensar dentro del sistema de destilación solar se muestran en el capítulo IV de resultados.

Para el funcionamiento del prototipo del destilador solar se realizó los siguientes procedimientos:

a.- Se vertió 7.5 L de agua salobre al prototipo del destilador, equipo que se aisló por la base y los costados para evitar pérdidas de calor por conducción.

b.- Se expuso el prototipo del destilador solar en la orientación Norte - Sur, en la azotea de un edificio de 4 pisos sobre una mesa, en el distrito de Wanchaq – Cusco (por inmediaciones de la plaza Tupac Amaru) de tal forma que este pudiera recibir la radiación solar máxima, con la mínima perturbación posible.

c.- Se instalaron las termocuplas y los sensores del Multilog Pro (sistema de adquisición de datos) en el sistema de destilación solar, con los sensores del multilog Pro se midió los valores de los parámetros de temperaturas.

d.- Se procedió a cerrar herméticamente el prototipo del destilador solar.

e.- Se procedió a recolectar los datos medidos por los sensores del Multilog pro encendiendo dicho equipo.

f.- La cantidad de masa de agua purificada se ha recolectado y medido con una bureta de 500 ml por hora de operación anteriormente mencionada, acumulándose en envase de vidrio el

para el análisis fisicoquímico respectivo, la cual se llevo al laboratorio de análisis de aguas Aqualab.

g.- las muestras del agua salobre de la localidad de Maras y del producto purificado se llevaron al laboratorio de análisis de aguas Aqualab, los resultados se muestran en el capítulo IV de resultados.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta como resultados : Las características del datalogger Multilog Pro, equipo utilizado en la recolección de la data de temperaturas en el sistema de destilación solar, el ángulo de inclinación seleccionado de la cubierta de vidrio, el prototipo del destilador solar construido, evaluación y los cálculos de la eficiencia térmica del sistema, eficiencia de masa de producción del equipo, las temperaturas promedio del sistema de los meses de agosto y setiembre, los volúmenes obtenidos de agua purificada por horas, volumen acumulado por día, los análisis fisicoquímicos del agua de alimentación y producto purificado, la propuesta del dimensionamiento del destilador solar que abastezca de agua para consumo humano para una familia.

4.1.- DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA CUBIERTA DE VIDRIO.

Tal como se indicó en el capítulo III, sobre la metodología de la selección del ángulo de inclinación, se muestran los resultados de las experiencias efectuadas en la siguiente tabla.

Tabla 11.

Resultados de la Prueba Experimental para la Elección del Ángulo de Inclinación.

Angulo de inclinación	13°	14.5°	17°	19°
Volumen de agua purificada	530 ml	590 ml	660 ml	550 ml

Como se puede ver en la tabla 4.1 se realizó 4 pruebas para la selección del ángulo de inclinación, iniciándose con un ángulo de 13° , se tomó este dato como base para iniciar las pruebas por aportes bibliográficos de Valera (1993), en la que menciona que el ángulo de inclinación de la cubierta del destilador solar se determina, empleando el valor de la latitud de la ciudad de funcionamiento del equipo, con este ángulo se obtuvo un volumen de 530 ml, se continuo experimentando y se incremento los valores a 14.5° , 17° y 19° , obteniendo volúmenes de 590 ml, 660ml y 550 ml respectivamente, obteniéndose un volumen mayor a 17° , ángulo que se utilizó para la construcción de la cubierta de vidrio del prototipo.

4.2.- PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR CONSTRUIDO

El prototipo de destilador solar se construyó de acuerdo a los parámetros de diseño que se mostro en el capítulo III, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

- Área = 0.15 m^2
- Ángulo de inclinación = 17°
- Dimensiones del prototipo del destilador = 30 cm de ancho, 25 y 10 cm de alto y 50 cm de longitud.
- Volumen de carga = 7.5 L
- Altura del nivel del agua en el prototipo del destilador = 5 cm
- Masa de destilado = 0.452ml
- Materiales: acero inoxidable para el evaporador y vidrio de 3 mm de espesor para la cubierta por donde ingresa la radiación solar.

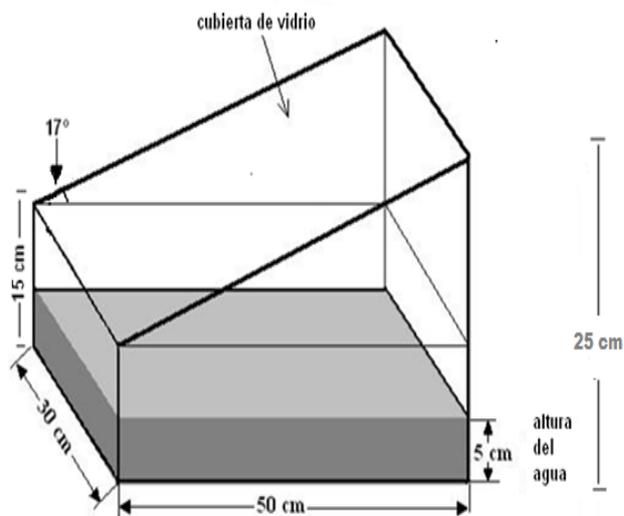


Figura: 4.1 Esquema del prototipo del destilador solar



figura: 4.2 Prototipo del destilador solar construido

4.3.- FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR

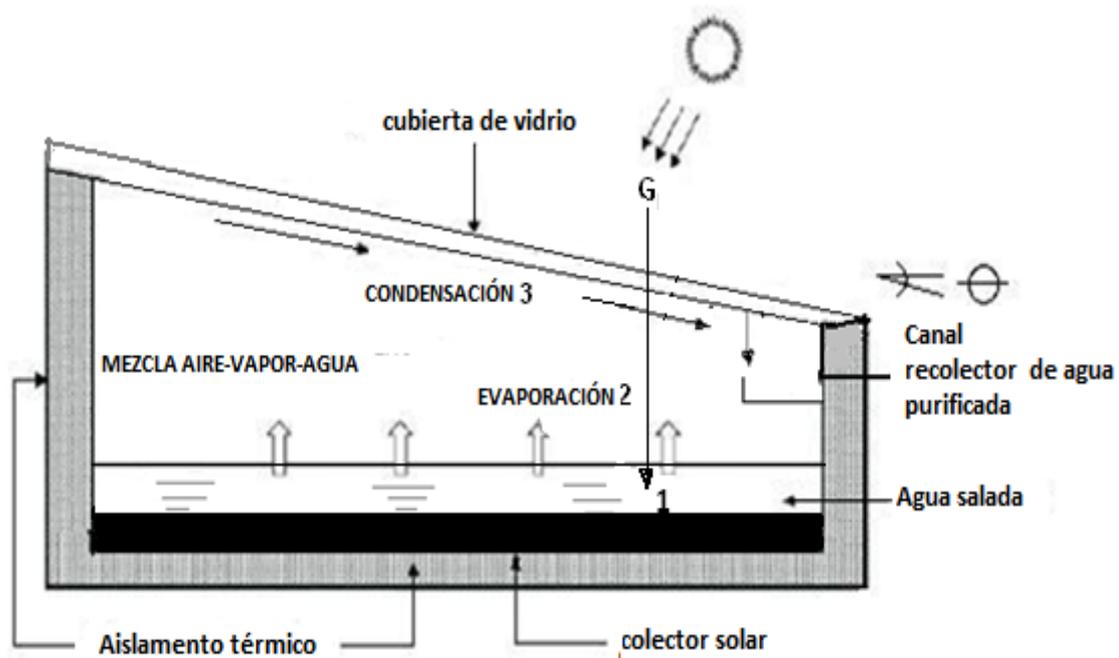


Figura: 4.3. Secuencia de la destilación solar

Como se puede ver en la figura 5.4, El prototipo del destilador solar es un sistema de desalación mediante evaporación, diseñado para aprovechar de un modo pasivo la energía solar y transformarla en energía térmica, haciendo uso del efecto invernadero, en los cuales ocurren diversos procesos térmicos que caracterizan su funcionamiento.

El prototipo consta de un depósito rectangular con el fondo de color negro, construido de acero inoxidable aislado térmicamente por el fondo y costados (Tecknopor), que contiene el agua salobre por destilar, y tiene paredes de poca altura. Una de las paredes de este recipiente tiene una altura de 25 cm mayor que la otra de 10 cm, para dar la inclinación de 17° necesaria para permitir el deslizamiento de las gotas de agua purificada por la superficie interna del mismo, hasta la canaleta de recolección del agua purificada y con salida por un tubo de acero inoxidable que se acopla a una manguera unida directamente al envase de recolección de agua purificada. Tiene además, un orificio en la parte superior de la pared posterior para la entrada de agua por destilar y uno en la parte inferior para rebozo (orificios que se consideraron, si se desea trabajar en estado continuo). La cubierta es una superficie transparente de vidrio l que esta acondicionada con un material hermético para evitar las pérdidas de calor, y que tiene como finalidad el conseguir aumentar la temperatura de volumen de aire que se encuentra justo encima de la superficie del agua de la bandeja. Dicha elevación de la temperatura se consigue gracias a la cubierta de vidrio, que actúa como trampa térmica de la radiación solar que logra atravesarla, lo que se conoce como efecto invernadero.

Este aumento de la temperatura provoca la evaporación de una pequeña fracción del agua salobre allí existente. El vapor producido, al entrar en contacto con la superficie interior de la cubierta de vidrio, se condensa formándose pequeñas gotas de destilado que terminan deslizándose debido a la pendiente de la cubierta y acaban siendo canalizadas a través del canal de recolección que se transportan al envase de almacenamiento de destilado.

A continuación se muestra fotos del funcionamiento del prototipo del destilador solar construido, los sensores del Multilog Pro instalados para la medición de temperaturas en el sistema de destilación solar, la condensación del agua purificada en la cubierta de vidrio, comportamiento de la data de temperaturas monitoreadas en el sistema y los volúmenes de la cantidad de agua purificada.



Foto N°1: Vista del Prototipo de destilador solar construido.



Foto N° 2: Vista del MultiLog Pro instalado con los sensores de conductividad y temperaturas en el sistema de destilador solar.



Foto N°3: Vista del sensor del Multilog Pro instalado en el prototipo para medir la temperatura exterior de la cubierta del vidrio del sensor del Multilog Pro instalado



Foto N°4: Vista de las gotas de agua condensada en la cubierta de vidrio del prototipo del destilador solar.



Foto N°4: Formación de gotas de agua por efecto de la condensación y deslizamiento por la superficie interna del vidrio hacia el canal de recolección.

4.4.- RESULTADOS DE LAS TEMPERATURAS MONITOREADAS EN EL SISTEMA DE DESTILACION SOLAR

Tabla 12

Temperaturas promedio medidas en el sistema de destilación solar mes de Agosto.

Ho ra	T _a (°C)	T _{ve} (°C)	T _{vi} (°C)	T _{ai} (°C)	T _{ag} (°C)	T _b (°C)	T _c (°C)	T _{pi} (°C)
9:00	17	5	5	7	10	6	8	8
10:00	18	10	15.3	17.6	33.6	14	17.6	31.7
11:00	19.4	28.6	30.7	32.4	47.9	16.5	22.9	42.3
12:00	19.8	42.8	46	47.9	57.8	18.8	24.8	50
13:00	20	48.5	50	58	62	22	27	54
14:00	19	46	47	56.7	58.5	21	26	50.1
15:00	17	38	40.2	49.6	52.3	21.3	25	40.6
16:00	15	36.7	39	44.8	47.6	20.6	24.8	39.7
17:00	14	28.1	29.7	40.1	41	20.4	22	33.2

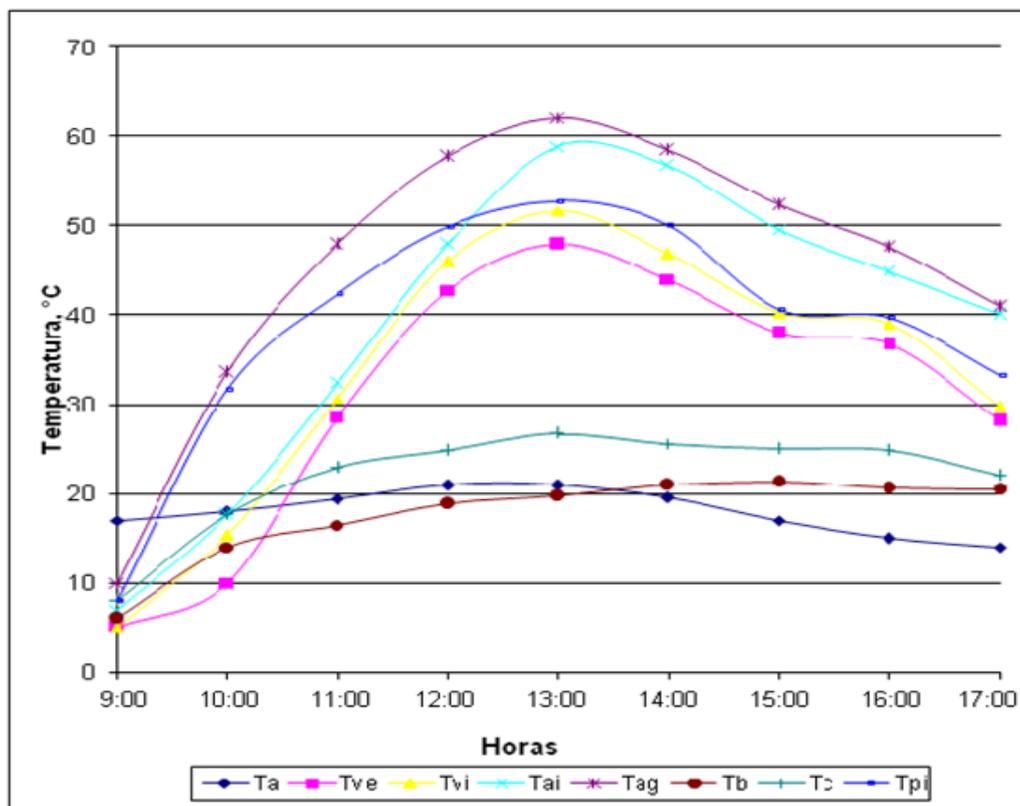


Figura 4-4. Temperaturas promedio en el sistema de destilación solar mes de Agosto.

Tabla 13.

Temperaturas Promedio Medidas en el Sistema de Destilación Solar Mes Setiembre.

Hora	T _a (°C)	T _{ve} (°C)	T _{vi} (°C)	T _{ai} (°C)	T _{ag} (°C)	T _b (°C)	T _c (°C)	T _{pi} (°C)
09:00	17	7	8	9	10.3	7	9	9.5
10:00	18	26	31.2	35.4	37.9	16.7	21.8	34.2
11:00	19	43.4	45.4	47.6	49.8	19.3	24.3	45.7
12:00	21	47.6	50.6	56.3	59.4	20.5	26.1	50.9
13:00	20	48	50.2	58	61.2	21.4	26.8	52
14:00	19	44.6	47.6	55.2	58.3	22.4	25.4	49.4
15:00	16	39.8	41.3	48.9	51.9	22.8	25	39
16:00	14	36.4	38.5	45.6	47.6	21.1	24.6	38.5
17:00	13	26.4	27	39	40.8	20.3	21.6	31.7

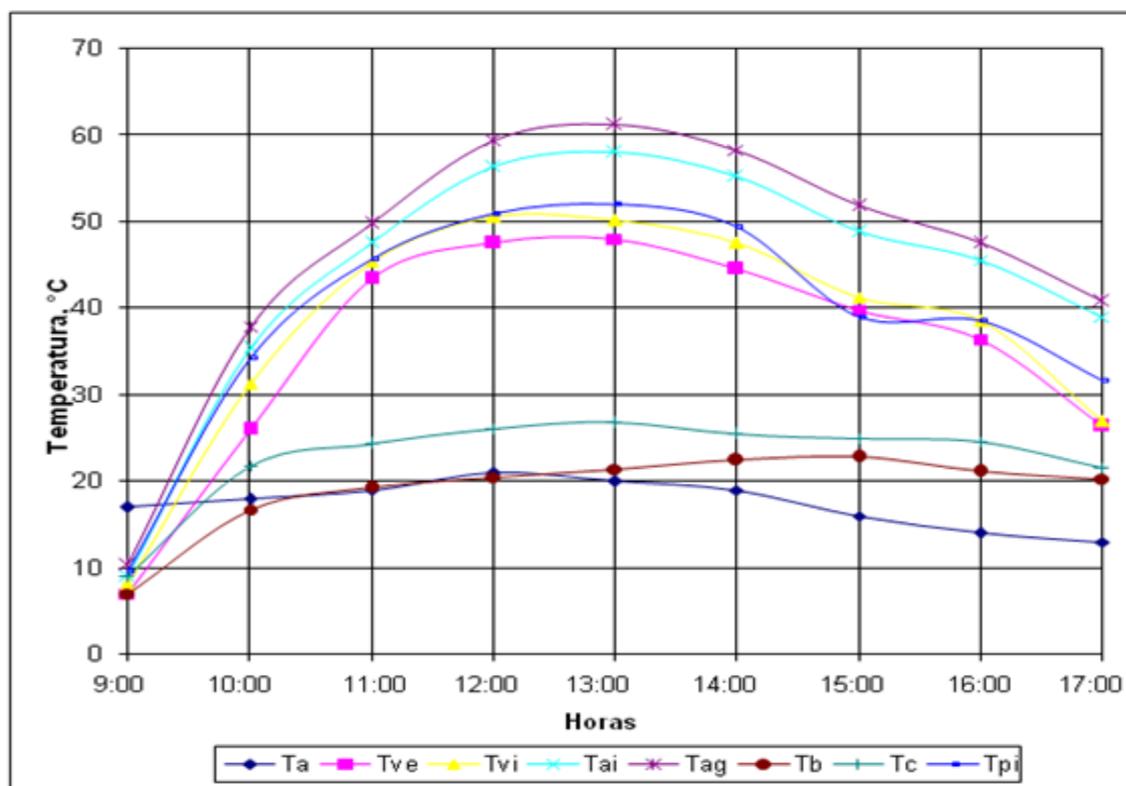


Figura 4.5: Temperaturas promedio medidas en el sistema de destilación solar mes de Setiembre.

De acuerdo a las tablas 12 y 13 y sus respectivas gráficas se puede demostrar que el aumento o disminución de las temperaturas $T_{vi}, T_{pi}, T_{ai}, T_{ag}$, dependen de la temperatura externa del vidrio, porque está expuesto a la radiación solar así como también a la velocidad del viento a medida que aumente o disminuya su velocidad determinara mayores o menores pérdidas por convección, a esta se debe agregar la corta distancia que existe entre la cubierta y el agua, lo que permite que los rayos solares atraviesen una pequeña masa de vapor y aire llegando en forma más directa al agua salobre, además el pequeño volumen de agua que contiene el prototipo del destilador hace que su temperatura se eleve mucho más rápido que en volúmenes grandes de agua. Observando que la temperatura del agua en el prototipo del destilador es superior a la temperatura del vidrio externo desde las 10:00 horas hasta las 17:00 horas en que se realizaron las pruebas, permitiendo que la producción de agua destilada se inicie desde la mañana en pequeñas cantidades y se incremente a medida que aumenta la temperatura en el agua, produciéndose un flujo de calor en el orden agua – cubierta- ambiente [$T_{ag}, T_{vi}, T_{ve}, T_a$) cediendo el sistema calor al medio.

Tambien se observó que las curvas siguen un comportamiento sinusoidal en ambos casos, con máximos coincidentes en el mismo punto alrededor del mediodía solar, cuando se alcanza el pico de irradiancia mayor.

4.5.- RESULTADOS DEL VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA EN EL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR

En la evaluación del prototipo del destilador solar se midió la producción del volumen en forma horaria de agua purificada, desde las 9:00 horas hasta las 17:00 horas al final del día (8 horas de operación), los resultados para un día del período evaluado se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14.

Volumén Acumulado de agua Purificada por Hora.

Tiempo (h)	Volumen (L)
9:00 - 10:00	0.022
10:00 - 11:00	0.038
11:00 - 12:00	0.059
12:00 - 13:00	0.084
13:00 - 14:00	0.099
14:00 - 15:00	0.075
15:00 - 16:00	0.046
16:00 - 17:00	0.029
Volumen de agua purificada acumulada en /8 h	0.452

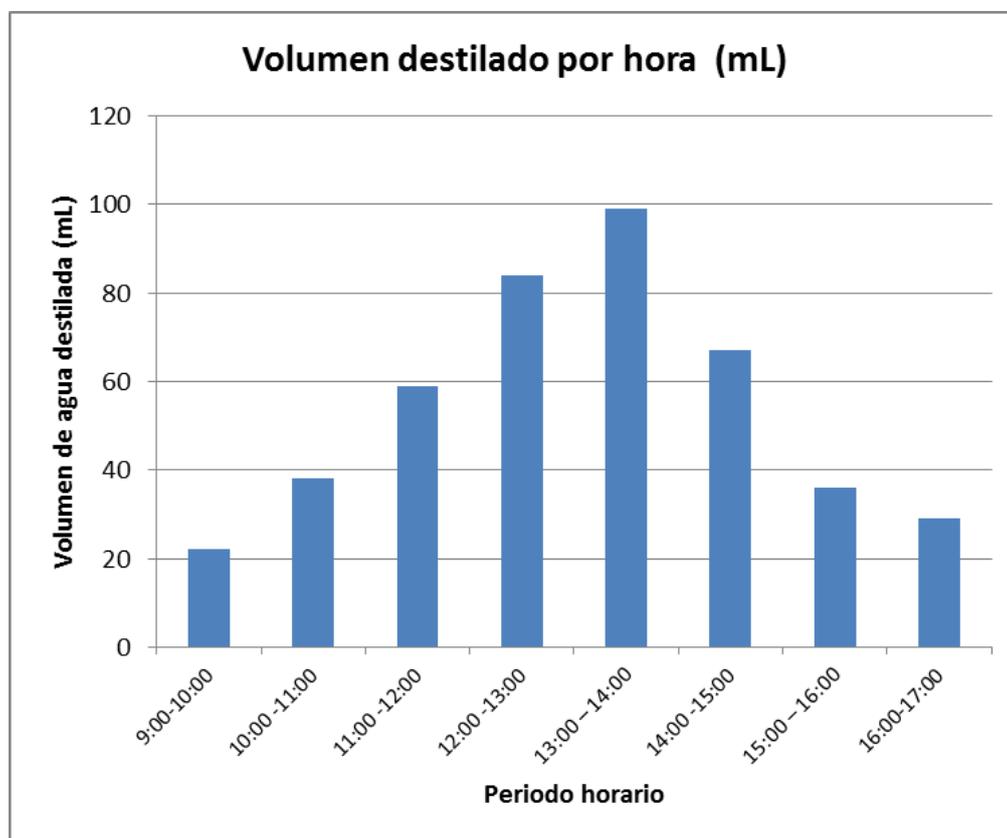


Figura.4.6: Volumen promedio del mes de agosto de agua purificada obtenido por horas

Al graficar (Figura 4.3) el volumen promedio de agua purificada obtenida por hora, se puede ver que el equipo comienza a destilar entre las 9:00 a.m, y las 10:00 a.m, y el volumen de agua purificada aumenta progresivamente alcanzando valores máximos entre las 12:00 pm y 2:00 pm, donde destila aproximadamente el 43 % del destilado total, horario donde la radiación solar es intensa. Luego, el volumen de agua purificada disminuye progresivamente hasta las 17:00 horas, tiempo en que termina de destilar.

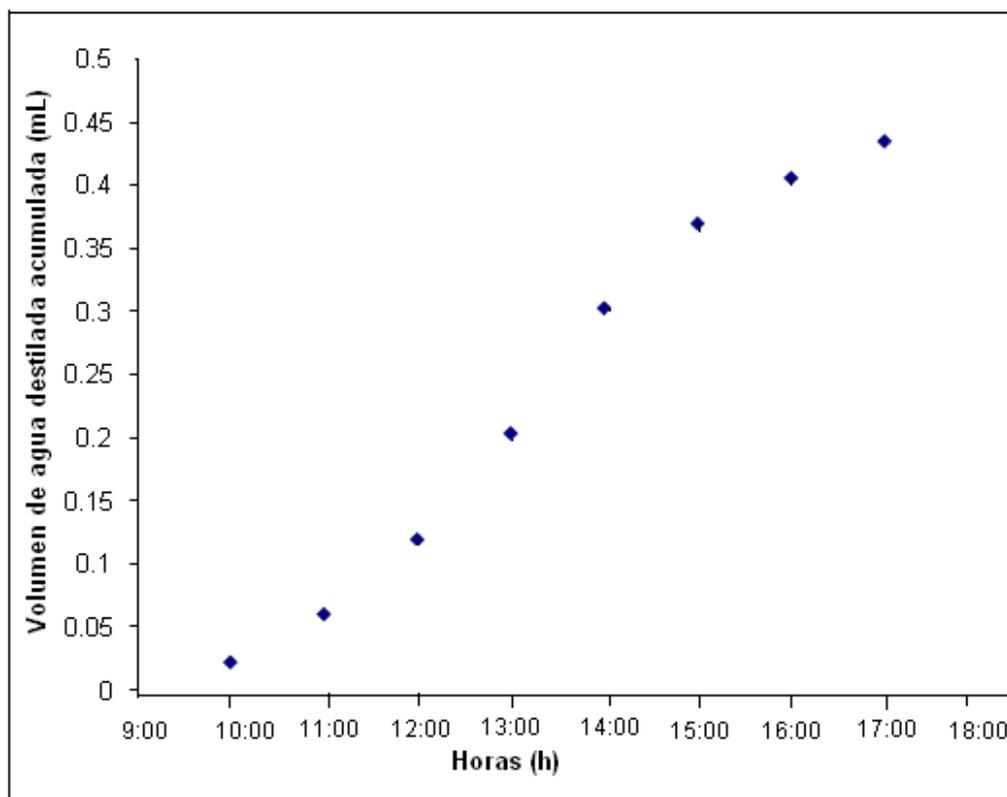


Figura. 4.7: Volumén promedio acumulado del mes de setiembre de agua purificada por hora.

En la figura 4.4, se representa la productividad acumulada durante las 8 horas de operación en la que se describe un comportamiento creciente, esto es lógico por que a medida que pasa las horas la irradiancia solar se incrementa, la temperatura ambiente aumenta y por ende la productividad, alcanzándose un volumen máximo de 452 ml.

4.6.- RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DE PRODUCCIÓN DIARIA DEL VOLUMEN DESTILADO

Tabla 4.5. Volumen promedio acumulado por días mes de setiembre.

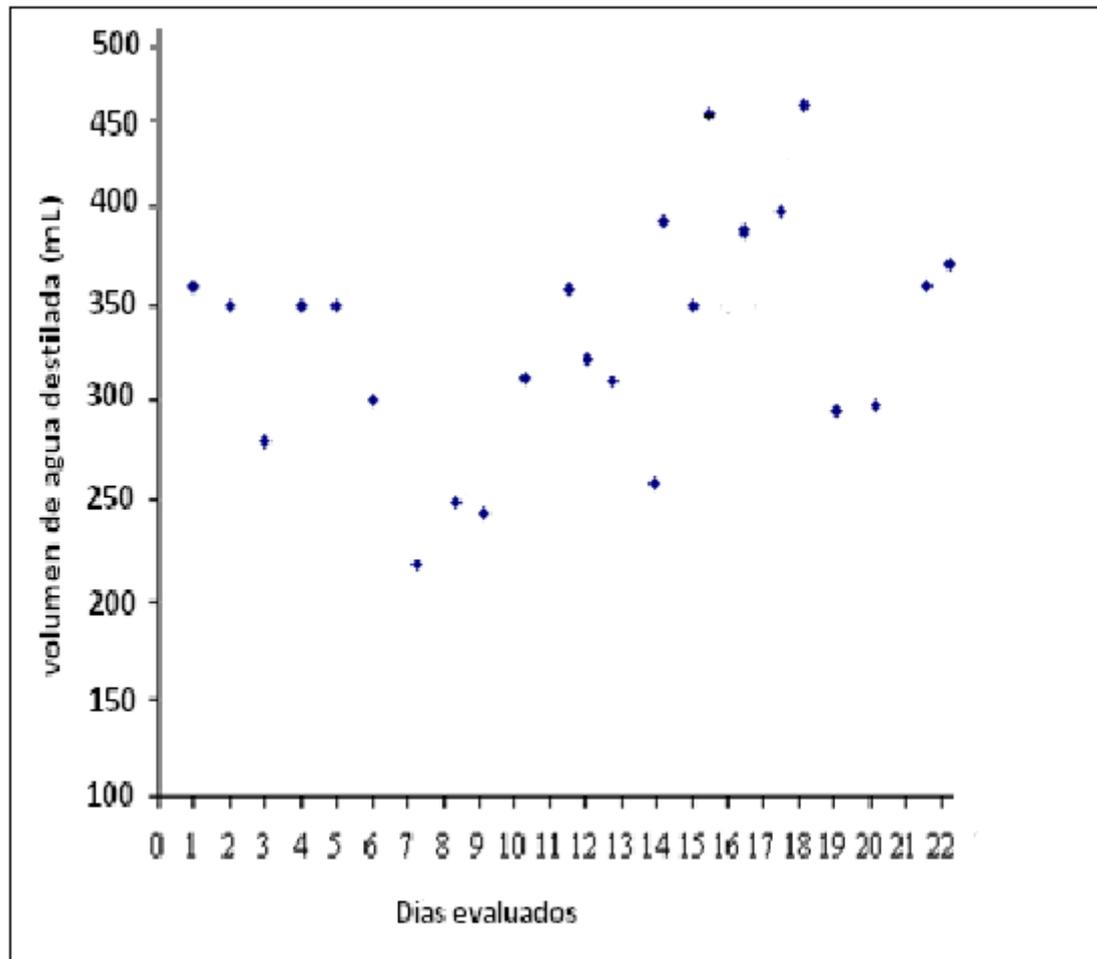


Figura.4.8.: volumen promedio acumulado por días, mes Setiembre.

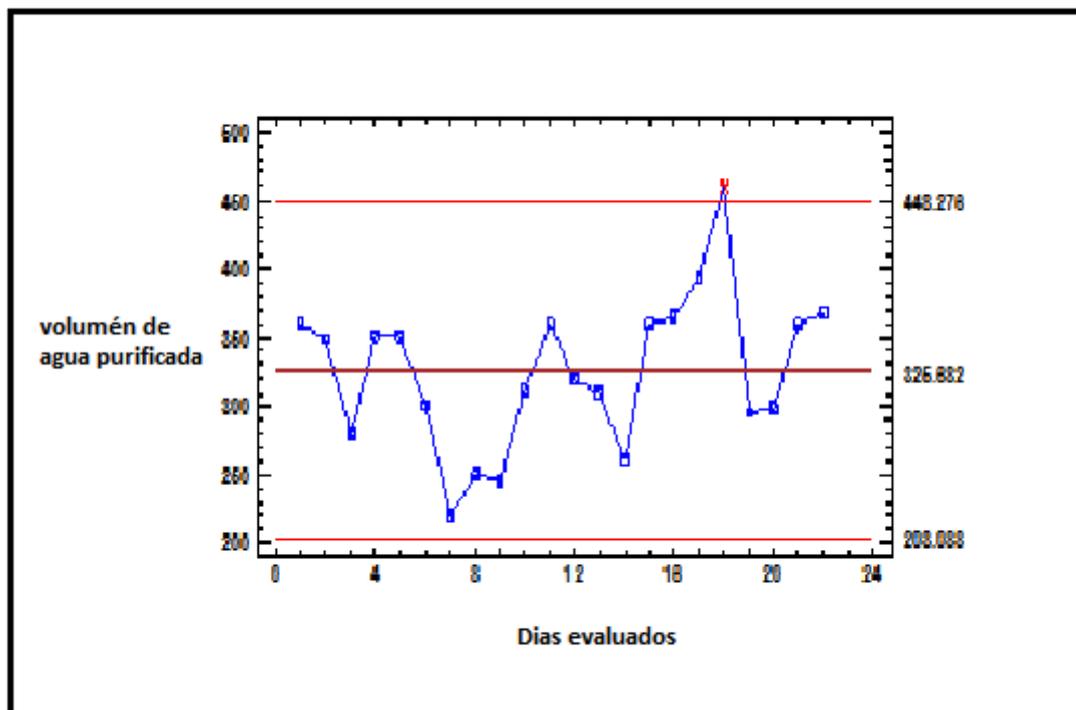


Figura 4.9: Cantidad de volumen acumulado por día, mes de setiembre.

El comportamiento del prototipo del destilador solar durante el mes de Setiembre se muestra en la Figura, (4.8 y 4.9), observándose que, las cantidades de los volúmenes del agua purificada varían, los cuales se deben a la variación e incidencia de la radiación solar existente entre un día y otro, cabe mencionar que esto es debido al paso de nubes y variabilidad de la velocidad del viento propios de las condiciones climáticas del Cusco, reflejando días nublados hasta días despejados, durante los días con mayor radiación se tuvieron periodos de nubosidad, así también con días nublados se tuvieron valores altos de radiación, lo que se ve reflejado en los volúmenes de producción alcanzadas en el sistema, esto explica que la mayor tendencia, es a obtener volúmenes entre los 300 ml como mínimo y 460 ml como máximo de agua purificada diariamente.

4.7.- EFICIENCIA TERMICA DEL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR.

La eficiencia térmica del sistema de destilación solar, se calculó con el fin de demostrar que, los mecanismos de transferencia de energía por conducción, convección, radiación que ocurren simultáneamente en el sistema de destilación solar están directamente relacionados, y también para determinar la cantidad de calor necesario para que se lleven a cabo los procesos de evaporación y condensación.

4.7.1.- BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía en el prototipo del destilador solar, se realizó con el objeto de determinar la eficiencia térmica del sistema de destilación solar en la ciudad del Cusco, con los datos que se obtuvieron en el monitoreo de las pruebas experimentales, cuyos datos se utilizarán en la resolución del planteamiento de las ecuaciones de intercambio térmico, citados en el capítulo II, ítem 2.14.

El proceso de los cálculos del balance de energía se realizó con los datos experimentales promedio medidos en el mes de agosto, para la 13:00 horas, horario en donde se tiene la mayor intensidad de radiación solar. A continuación se muestran los datos experimentales promedio medidos con el Multilog pro en el sistema de destilación solar para el mes de agosto.

Tabla 15

Datos experimentales promedio del mes de Agosto, tomadas para las 13:00 horas en el prototipo del destilador solar

Datos Experimentales					
Temperatura ambiente	T_a	20	°C	5	290.1 K
Temperatura del vidrio exterior	T_{ve}	48.5	°C	5	321.6 K
Temperatura del vidrio interior	T_{vi}	50	°C	5	323.1 K
Temperatura del aire interior	T_{ai}	58	°C	5	331.1 K
Temperatura del agua	T_{ag}	62	°C	5	335.1 K
Temperatura de la base	T_b	22	°C	5	295.6 K
Temperatura de los costados	T_c	27	°C	5	300.1 K
Temperatura de la pared interior	T_{pi}	54	°C	5	327.1 K
Velocidad del viento	V	2.1	m/s		
Radiación solar promedio	G	5640	W/m^2		
Cantidad de agua purificada	m_d	0.45		2	Kg

La ecuación del balance de energía en el sistema de destilación solar esta dada por la ecuación (2.14) de [DUFFIE Y BECKMAN, 1980, (Pag. 658)] definida en el capítulo II.

$$G = \frac{q_{r,ag-vi}}{A} + \frac{q_{c,ag-vi}}{A} + \frac{q_e}{A} + \frac{q_k}{A} + \frac{(mC_p)_{ag}}{A} \frac{dT}{dt}$$

Iniciando con los cálculos así:

Cálculo del flujo de calor por radiación desde el agua a la cubierta de vidrio ($q_{r,ag-vi}$)

$$\frac{q_{r,ag-vi}}{A} = 5.1084 \times 10^{-8} (T_{ag}^4 - T_{vi}^4)$$

Datos:

$$T_{ag} = 62^\circ C = 335.15K$$

$$T_{vi} = 50^\circ C = 323.15K$$

$$A = 0.15m^2$$

Entonces:

$$q_{r,ag-vi} = 87.46 \text{ W/m}^2$$

Presiones del agua en el destilador (P_{ag}).

Las presiones de vapor se tienen de las tablas de vapor a la temperatura del agua y temperatura del vidrio para las 13:00 horas.

Entonces:

$$T_{ag} = 62^\circ C = 335.15K \quad P_{ag} = 163.8 \text{ mmHg}$$

$$T_{vi} = 50^\circ C = 323.15K \quad P_{vi} = 92.56 \text{ mmHg}$$

Diferencia de temperatura entre temperatura del agua en la base y temperatura del agua del vidrio.

Área interna ($T_{ag}-T_{vi}$).

$$T_{ag} - T_{vi} = 62^\circ C - 50^\circ C$$

$$T_{ag} - T_{vi} = 12^\circ C$$

Diferencia de temperatura entre temperatura del vidrio en el área externa y la temperatura del aire ($T_{ve}-T_a$).

$$T_{ve} - T_a = 48.5^\circ C - 20^\circ C$$

$$T_{ve} - T_a = 28.5^\circ C$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección (h_c).

Se calculó por la ecuación de Duffie y Beckman, 1980, (pag.658)

$$h_c = 0.884 \left[(T_{ag} - T_{vi}) + \left(\frac{P_{ag} - P_{vi}}{2016 - P_{ag}} \right) T_{ag} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Datos:

$$T_{ag} = 62^\circ C = 335.15K \quad P_{ag} = 163.8 \text{ mmHg}$$

$$T_{vi} = 50^\circ C = 323.15K \quad P_{vi} = 92.56 \text{ mmHg}$$

Entonces:

$$h_c = 4.04 \text{ W/m}^2\text{K}$$

El calor latente se obtiene de las tablas de vapor a $62^\circ C$

Datos:

$$T_{ag} = 62^\circ C = 335.15K \quad h_{fg} = 2353700 \text{ J/kg}$$

Flujo de calor por evaporación– condensación: (q_e).

$$\frac{q_e}{A} = 9.15 \times 10^{-7} h_c (P_{ag} - P_{vi}) h_{fg}$$

Datos

$$h_c = 4.4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$P_{ag} - P_{vi} = 93.61 \text{ mmHg}$$

$$h_{fg} = 2353700 \text{ J/kg}$$

Entonces:

$$q_e = 1125.53 \text{ W/m}^2$$

Flujo de calor por convección desde el agua a la cubierta de vidrio ($q_{c,ag-vi}$).

$$\frac{q_{c,ag-vi}}{A} = h_c(T_{ag} - T_{vi})$$

Datos:

$$h_c' = 7.34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$T_{ag} - T_{vi} = 12 \text{ K}$$

Entonces:

$$q_{c,ag-vi} = 88.02 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Calculo de G

La radiación absorbida por el vidrio esta dada por:

$$G = G(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a)$$

Los valores de α_v y α_a son 0.1 y 0.3 respectivamente. [COOPER, 1972]

La radiación solar promedio para las 13:00 horas, por metro cuadrado en el Cusco es de:

$$G = 5640 \text{ W}$$

$$5640(1 - 0.1)(1 - 0.3)$$

$$G = 3553 \text{ W/m}^2$$

Flujo de calor por radiación desde la cubierta de vidrio al aire ($q_{r,ve-a}$).

$$\frac{q_{r,ve-a}}{A} = 4.819 \times 10^{-8} (T_{ve}^4 - 9.284 \times 10^{-6} T_a^6)$$

Datos:

$$T_{ve} = 48.5^\circ\text{C} = 321.65\text{K}$$

$$T_a = 20^\circ\text{C} = 293.15\text{K}$$

Entonces:

$$q_{r,ve-a} = 231.87 \text{ W/m}^2$$

Flujo de calor por convección desde la cubierta de vidrio al aire ($q_{c,ve-a}$).

$$\frac{q_{c,ve-a}}{A} = (5.7 + 3.8v)(T_{ve} - T_a)$$

Datos:

$$v = 2.1 \text{ m/seg}$$

$$T_{ve} - T_a = 27^\circ\text{C}$$

Entonces:

$$q_{c,ve-a} = 389.88 \text{ W/m}^2$$

Cantidad de calor necesario para evaporar el agua

$$Q_{evaporar} = \dot{x} * m_{ag} * \lambda$$

$$Q_{evaporar} = (1 * 0.452 \text{ kg} * 2353700 \text{ J/kg}) / 3600$$

$$Q_{evaporar}=295.5 \text{ w}$$

Cantidad de calor necesario para calentar el agua

$$Q_{calentar}=m_{agua} * C_{p_{agua}} (T_{ag}-T_a)$$

$$Q_{calentar}=0.452\text{kg} * 4189\text{J/kg. } ^\circ\text{k} * (335.15-293.15)^\circ\text{k}$$

$$Q_{calentar}=22.26\text{w}$$

Cantidad de calor necesario para calentar el vidrio

$$Q_{calentar,vi}=m_{vi} * C_{p_{vi}} (T_{vi}-T_a)$$

$$Q_{calentar,vi}=6.02 \text{ kg} * 750\text{J/kg. } ^\circ\text{k} * (323.15-293.15)^\circ\text{k}$$

$$Q_{calentar}=37.63\text{W}$$

Calor necesario para calentar el vidrio y evaporar el agua

$$Q_{necesario}=Q_{calentar,vidrio}+Q_{calentar,agua}+Q_{evaporar,agua}$$

$$Q_{necesario}=355.39 \text{ W}$$

FLUJO DE CALOR ABSORBIDO POR EL SISTEMA

Calor almacenado en el interior del prototipo del destilador solar por el agua y la base

$$Q_{abs.int} = (G * (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a)) - (q_e + q_{c,ag-vi} + q_{r,ag-vi} + q_k)$$

Calor almacenado por la cubierta de vidrio.

$$Q_{abs.ext} = (q_e + q_{c,ag-vi} + q_{r,ag-vi} + (G * \alpha_v)) - (q_{r,ve-a} + q_{c,ve-a})$$

Por tanto se tiene:

$$Q_{absorvido} = Q_{abs.int} + Q_{abs.ext} = (G * (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a)) + (G * \alpha_v) - (q_{r,ve-a} + q_{c,ve-a})$$

Datos:

$$q_e = 87.47 \text{ W/m}^2$$

$$q_{c,ag-vi} = 88.02$$

$$q_{r,ag-vi} = 1125.53 \text{ W/m}^2$$

$$(G * (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_a)) = 3553 \text{ w/m}^2$$

$$G * (\alpha_v) = 564 \quad \text{donde: } \alpha_v = 0.1$$

$$q_{r,ve-a} = 231.87 \text{ W/m}^2$$

$$q_{c,ve-a} = 369.88 \text{ W/m}^2$$

Reemplazando se tiene:

$$Q_{absorvido} = 3496 \text{ W/m}^2 * 0.15 \text{ m}^2 = 524 \text{ W}.$$

ENERGIA TOTAL ALMACENADA

$$Q_{almacenado,sistema} = Q_{necesario} + Q_{absorvido}$$

$$Q_{almacenado,sistema} = 355.39 \text{ w} + 524 \text{ w}$$

$$Q_{almacenado,sistema} = 879.39 \text{ w}$$

Empleando la ecuación N° 2.37 se tiene.

$$\eta_{térmica} = \frac{Q_{almacenado,sistema}}{G * \alpha_a} * 100$$

$$\eta_{térmica} = 35\%$$

La eficiencia térmica del prototipo del destilador calculado fue del 35%, este valor según bibliografía revisada en los destiladores solares tipo caseta se llega a alcanzar entre el 30 al 35 % de eficiencia, por lo cual el rendimiento del prototipo del destilador solar construido en Cusco esta dentro de los valores considerados en aportes bibliográficos, también en el proceso de cálculo de la eficiencia térmica se evidencio la cantidad de calor necesaria para purificar un volumen determinado de agua apta para consumo humano,

Resultados con las cuales se puede proponer construir destiladores solares de mayor área para obtener mayor cantidad de volumen de agua purificada apta para consumo humano, y abastecer a familias que no tengan acceso a agua potable, tomando en cuenta: aportes bibliográficos investigados y metodología plasmada en el presente trabajo.

4.8.- RESULTADOS DE LA EFICIENCIA VOLUMETRICA DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES DEL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR CONSTRUIDO.

La eficiencia de las mediciones experimentales esta dada por la ecuación (2.39) del capitulo II.

$$\eta_i = \frac{m_d h_{fg}}{GA}$$

Para determinar la eficiencia de los datos experimentales por hora, se tomo en cuenta: la radiación solar promedio por hora del Cusco dada por Senamhi, (2010); y los valores del calor latente de vaporización desde las 9:00 hasta las 17:00 horas, valores que se tomaron de las tablas de vaporizacion de acuerdo a la temperatura horaria por dia de operación. Estos valores se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 16.

*Valores de Radiación Solar Promedio Por Hora en el Cusco,
Para Los Meses de Agosto y Setiembre 2010.*

Hora	G (kW.h/m ²)	G (kJ/m ²)
9:00-10:00 a.m.	0.4403	1585.08
10:00 - 11:0 a.m.	0.6556	2360.16
11:00 - 12:00 a.m.	0.7583	2729.88
12:00 - 13:00 p.m.	0.7652	2754.72
13:00 - 14:00 p.m.	0.7893	2841.48
14:00 - 15:00 p.m.	0.6246	2248.56
15:00 -16:00 p.m.	0.5343	1923.48
16:00 - 17:00 p.m.	0.4086	1470.96
17:00 - 18:00 p.m.	0.2443	879.48
Radiación solar promedio/día	5.640	20304.56

Fuente: [Senamhi, 2010]

Tabla 17.

Valores de calor latente de vaporización por día de operación.

Hora	T (°C)	h _{fg} (kJ/h)
09:00	10	2477.9
10:00	33.6	2423.8
11:00	47.9	2389.1
12:00	57.8	2380.7
13:00	62	2353.7
14:00	58.5	2362.5
15:00	52.3	2375.1
16:00	47.6	2389.2
17:00	41	2404.5

RESULTADO DE LAS EFICIENCIAS PROMEDIO VOLUMETRICAS DE MEDICIONES EXPERIMENTALES POR HORA.

Tabla 18.

Resultado de Eficiencias Volumétricas Promedio por Hora

Hora	T (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	G (kJ/m ²)	m_d (kg)	$h_{fg} * m_d$	G*A	%
8:00 - 9:00	10	2477.9	1585.08	0	0	237.762	0
9:00 - 10:00	33.6	2423.8	2360.16	0.022	53.32	354.024	15.06
10:00 - 11:00	47.9	2389.1	2729.88	0.038	90.78	409.48	22.17
11:00 - 12:00	57.8	2380.7	2754.72	0.059	140.46	413.208	33.99
12:00 - 13:00	62	2353.7	2841.48	0.084	197.71	426.222	46.38
13:00 - 14:00	58.5	2362.5	2248.56	0.099	233.88	337.284	69.34
14:00 - 15:00	52.3	2375.1	1923.48	0.075	178.13	288.522	61.73
15:00 - 16:00	47.6	2389.2	1470.96	0.046	109.90	220.644	52.81
16:00 - 17:00	41	2404.5	879.48	0.029	69.73	131.922	49.85
promedio de eficiencia de mediciones experimentales							39.04

De acuerdo a la tabla 18. Se puede observar:

Que la eficiencia del prototipo construido, depende directamente de la radiación solar incidente en el equipo experimental, también se puede ver, que a medida que se incrementa la radiación solar con las horas del día, aumenta la temperatura y por ende se obtiene una mayor cantidad de masa de agua purificada, comparando también con los días de alta, media y baja incidencia de radiación solar típica de las condiciones climáticas del Cusco.

Que el equipo llega a una eficiencia máxima de 69% entre las 13:00 y 14:00 horas obteniéndose una masa de destilado de 0.099 kg, la cual es correcta por que generalmente en ese horario es cuando se siente la mayor incidencia de radiación solar.

4.9.- RESULTADOS DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA SALOBRE DE LA LOCALIDAD DE MARAS Y DEL AGUA PURIFICADA OBTENIDA.

Se envió 1 muestra de agua salobre obtenida de la salinera de Maras, utilizada como alimentación al prototipo del destilador solar y otra muestra de agua purificada producida por destilación solar al laboratorio de AQUALAB para su respectivo análisis.

Tabla 19.

Resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al agua salobre de la localidad de Maras y de agua purificada en el Laboratorio de Aqualab

PARAMETRO	UNIDAD	LMP	AGUA DE SALOBRE	AGUA PURIFICADA
		Sunass	(Maras)	(Por radiación solar)
Alcalinidad total	mg/L		250	33
Dureza Total CaCO ₃	mg/L	500	6500	13
Acidez total CO ₂	mg/L		99	6.6
Cloruros Cl	mg/L	250	387	25
Sulfatos SO ₄	mg/L	250	6200	7.0
pH		6.5 - 8.5	alto*	7.0
Conductividad	uS/cm	1500	alto*	86.6
Turbiedad	NTU	5	alto*	1.0

*: Fuera del rango de lectura del equipo

LMP: Limite máximo permisible.

Sunass: Superintendencia Nacional de Saneamiento

De acuerdo al resultado del análisis fisicoquímico, se demuestra que a través de la destilación solar, los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación (agua

salobre de localidad de Maras), se reducen a valores que fluctúan dentro de los parámetros de calidad de agua y límite máximo permisibles (LPM) de agua potable según la SUNASS, así como también se demuestran que a través de la destilación solar, el prototipo construido es altamente eficiente en la remoción de sales, obteniéndose como producto agua purificada, físicamente apta para consumo humano.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua se muestran en el anexo 1.

4.10-. COSTO DEL PROTOTIPO DEL DESTILADOR SOLAR

El prototipo del destilador solar es un equipo experimental construido en el taller de Industrias Edisur S.C.R.L. de la ciudad del Cusco, es un prototipo que está acondicionado para hacer pruebas experimentales a nivel de laboratorio con los parámetros meteorológicos de la ciudad del Cusco, cuyos resultados de las pruebas experimentales contribuyen al diseño, construcción y evaluación de un destilador solar para abastecer de agua purificada apta para consumo humano en zonas que no cuentan con este recurso imprescindible.

Tabla 20.

Costo de Materiales del Prototipo del Destilador Solar

Cantidad	Material	Costo (S/.)
2	Planchas de acero inoxidable	180.00
1	Lamina de vidrio de 3 mm de espesor	70.00
2	Tubos de cobre	40.00
¼ kilo	De pintura negra anticorrosiva	16.00
2	Bisagras	25.00
1m	De material hermético	20.00
2	Planchas de material aislante	10.00
1	Manguera para la recolección	15.00
1	Brocha	10.00
1	conector con contratuerca	25.00
2	Siliconas	20.00
	Soldadura	50.00

Mano de obra

El costo de mano de mano de obra de la construcción del prototipo del destilador solar fue de S/.450.00

Servicios

Costos imprevistos y otros S/. 100.00

Costo total

El costo real del prototipo del destilador solar fue de S/. 1031.00 nuevo soles

El costo de agua producida en un destilador solar es analizado considerando lo siguiente:

- 1.- Capital invertido
- 2.- Costo de operación, mantenimiento y reparación.
- 3.- La producción de agua purificada.

Los variables anteriores están sujetos a las variaciones atmosféricas que influyen en la producción del destilador.

4.11.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS.**Ventajas**

- A través de esta técnica se conserva el medio ambiente
- Se economiza gran cantidad de energía eléctrica
- Con la cubierta de vidrio se aumenta su producción, duración y calidad del agua, ya que el vidrio es más limpio que el plástico.

- En cuanto al costo de agua purificada, es más económico a comparación con otros sistemas.
- Es de fácil operación y mantenimiento.

Desventajas

- Depende fundamentalmente de las condiciones climáticas
- Cuidar de que no se rompa la cubierta.

4.12.- RESULTADOS DE CONSUMO PROMEDIO DE AGUA POR HABITANTE.

La cantidad promedio de habitantes por familia es de 4 personas,

El volúmen de agua necesaria para una familia compuesta de 4 personas es de 28 L/día.

Resultado que se tomo en cuenta para proponer el área del destilador solar que abastezca de agua apta para consumo humano para una familia.

4.13.- CÁLCULO DEL ÁREA DEL DESTILADOR SOLAR.

Con el prototipo del destilador solar construido con un área de 0.15 m^2 se obtuvo un volumen acumulado de agua para consumo humano de 0.452 L/día de operación.

Para una familia de 4 integrantes el volúmen necesario es de 28 L.

Por tanto el área estimada del destilador solar para una familia será de:

$$0.327 \text{ L} \text{-----} A = 0.15 \text{ m}^2$$

$$28 \text{ L} \text{-----} A = ?$$

$$A = 12.8 \text{ m}^2$$

Con los valores calculados de cantidad de calor absorbido por el sistema de destilación solar en Cusco, el cálculo del área del destilador solar para abastecer de agua purificada a una

familia, se puede diseñar y construir destiladores solares tomando en cuenta los resultados de las pruebas experimentales, conclusiones y recomendaciones para optimizar el rendimiento del equipo.

CONCLUSIONES

- ✓ El prototipo del destilador solar construido con una capacidad de 7.5 L purifica un volumen de 0.452 L de agua apta para consumo humano en un tiempo de 9 horas de operación. El prototipo del destilador solar de 0.15 m² de area, trabaja con un nivel de agua de 5 cm, un ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio de 17°.
- ✓ Con los parámetros de construcción del prototipo del destilador solar construido en la ciudad del Cusco, se alcanzó una eficiencia térmica del 35 % y una eficiencia volumétrica de 39 %.
- ✓ De acuerdo a los resultados del análisis fisicoquímico y comparando los parámetros del agua salobre, el destilado obtenido de la salinera de Maras cumple con todos los parámetros establecidos en los estándares de calidad del agua potable, llegando a reducir de una concentración de 387 mg/L a 25 mg/L en cloruros, y de una concentración de 6500 mg/L a 33 mg/L de dureza total en el agua purificada, parámetros que cumplen con las normas de calidad de agua para consumo humano.
- ✓ con el cálculo promedio efectuado de la producción de agua purificada en el prototipo durante el mes de setiembre, se obtuvo un volumen máximo de 0.448 L , un volumen minimo de 0.208 L y un volumen medio de 0.327 L, valor con la cual se determinó un área de 12.8 m² dato con el cual se propone construir un destilador solar para abastecer las necesidades de agua apta para consumo humano para una familia de 4 personas.

RECOMENDACIONES

- ❖ Ampliar el área del destilador y disminuir su altura, ya que esto facilitara que el agua tenga una mejor distribución y que el calor necesario para realizar el proceso sea menor, mejorando la eficiencia.
- ❖ Ubicar el prototipo del destilador solar (ubicación norte-sur), de tal forma que la incidencia solar sea absorbida lo máxima posible, para que su eficiencia sea óptima.
- ❖ Mejorar el aislante térmico del prototipo del destilador solar para mantener el flujo de calor en el interior del prototipo y evitar perdidas de calor.
- ❖ Mantener siempre limpia la cubierta y el evaporador de agua a destilar, el primero para evitar que se vea disminuido el término de la transmitancia de la radiación, a través de la cubierta y el segundo para eliminar las incrustaciones que se forman en el fondo, las cuales disminuyen la absortancia en el contenedor metálico.

REFERENCIAS

- APHA, (1995). *Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater*. USA: American Public Health Association, Washington, DC 20005, 19th Edition,
- Bird, R.B, Stewart, W.E y Lightfoot, E.N. (Ed). (1997). *Fenómenos de Transporte*, 2^{da} ed. Edit. John Wiley & Sons, New York.
- Cooper, P.I. (Ed). (1973) “*The maximum efficiency of single effect solar stills*” *Solar Energy*, 1^{ra}ed, Edit. Prentice hall Hispanoamericana, España.
- Duffie, J. A y Beckman, W. A. (Ed). (1980), *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2^{da}ed. Edit. John Wiley & Sons, New York.
- Dévora-Isiordia, G.E., González Enríquez, R., Ruiz-Cruz, S. (2013). *Evaluation of Desalination Processes and their Development in Mexico*. Water Technology and Sciences, 4:3, 25-43.
- International Atomic Energy Agency, (2000). *Guidebook on Introduction of Nuclear Desalination, Technical Reports Series No. 400*, IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, 1997. *Thermodynamic and Economic Evaluation of Co-production Plants for Electricity and Potable Water*, IAEA-TECDOC-942, Vienna
- Incropera F. P. y DeWitt, D.P., (Ed). (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Ed. Edit. John Wiley and Sons, USA,
- Kiely G. (1999). *Ingeniería ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión* Madrid: Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S.A.U.
- Meinel, A. y Meinel, M., (Ed).(1987). *Aplicaciones de la energía solar*, 3^{ra}ed. Edit. Reverté, S. A., España 1987,
- McCabe, W., Smith, J. C., Harriott, P., (Ed). ((1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, 4^{ta}ed. Edit. McGraw-Hill Interamericana de España, S. A. U.
- Sartori, E., (Ed).(1996). *Solar Still versus Solar Evaporator. A comparative Study between Their Thermal Behaviors*. *Solar Energy*, 2da. ed. Edit. Technological de España, España.

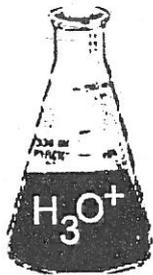
- Senamhi, (2010). *Atlas de energía solar del Perú, Dirección general de investigación y asuntos Ambientales*, Cusco – Perú.
- Sibaia, E., & Peterson, D., (Ed).(1985). *Colectores Solares*, 1^{ra} ed. Edit. Tecnológica de Costa Rica, Costa Rica.
- Valera, P.A., (1993). *Energía solar – Teoría y Práctica, Tomo I, Universidad Nacional de Ingeniería*, Lima– Perú.
- Aybar, H., Fuat, E., y Aticol, U., (2005), *Diseño de un sistema de destilación solar para agua, bajo las condiciones ambientales al norte de Cyprus*, (tesis de pregrado), Earstem Mediterranean University, Turquía.
- Barrios, F., (2000), *Diseño, construcción y evaluación de un Destilador solar tipo escalera*, (tesis de pregrado), Universidad Nacional San Antonio Abad, Cusco – Perú.
- García, M., (1999), *Diseño y construcción de un destilador solar*, (tesis de pregrado) Universidad Nacional San Antonio Abad, Cusco – Perú.
- Gálvez, E., Roth, P., Schwarzer, K., (2004), *Desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura: diseño, modelación y simulación*, (tesis de pregrado), Solar-Institut Jülich de la Fachhochschule de Aachen, Alemania.
- Hatakeda, K., (2004), *Diseño Construcción y Evaluación de un secador solar*, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco – Perú.
- Blanco, J & Alarcón, D. (Julio de 2006). *Memorias del Taller Internacional: Nuevas Tecnologías para la Descontaminación y Provisión de agua en zonas rurales*. Taller llevado a cabo en el Instituto Peruano Nuclear, Lima – Perú.
- Sunass, (2000), Oficio Circular No 677-2000/ INF. Límites máximo permisibles (Imp) referenciales de los parámetros de calidad del agua. Lima.
- Dévora, E., González, R., Ruiz, S. (2013). Evaluation of Desalination Processes and their Development in Mexico. *Water Technology and Sciences*, 4:3, 25-43.
- ITESO (1995). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, *curso de energía solar*, Mexico.

- INEI (Junio, 2018). Instituto Nacional de Estadística e Informática. *Formas de Acceso al Agua y Saneamiento Básico*, Lima.
- López, M. y Mejías, G. (2000). *Las aguas salobres una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas*. http://www.acquamatter.com/desalacion_del_agua.
- La torre, M. (2001). *La Desalación y Reutilización del Siglo XXI*.
<http://www.cepis.org.pe/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt030.html>:
- Pavlovic, P & Vergara, L. (1983). VI International Symposium of salt, Institute: *Solar Pond design for the production of salts from the solar de Atacama brine*, USA.
- Rhoedes, W. (1999). *Sustitución del destilador solar de vidrio de Telkes, M., por acero inoxidable a prueba de fuego*, Arizona – EE: UU.
- Shvam S. Nandwani, (2013). Destilador solar - Construcción, Funcionamiento y Uso. Folleto. Costa Rica.
- Wilson, C. (1982), *construcción de la primera planta de destilación solar “convencional” Chile*
- Wangnick, . (2000), *Sistemas de desalación de agua, estudios económicos, análisis financiero, sistemas ahorradores de energía, 2000*.
- Wangnick, K. (2000), IDA World wide Desalting Plants Inventory Report N° 16,25 – 246, USA. Wangnick consulting, Gnarrenburg
- Yabrudi, S. (2004). *Desalinización de agua subterránea salina, empleando un destilador solar tipo caseta asimétrico*. Venezuela.
- Rodríguez S. 2010. *La dureza del agua*.
http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf
- Roig y Corp. (2006). *La destilación solar: una solución para la industria farmacéutica*
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar14/HTML/articulo01>
- Technical Staff Fuji Hunt Photographic Chemicals Inc, (1993-2004). *Agua, pH y conductividad para los impresores*. 50 Industrial Loop North Orange Park, Florida
www.fujihuntusa.com | www.anchorlith.com

ANEXOS

ANEXO 1.

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE LAS AGUAS SALOBRES DE LA LOCALIDAD DE MARAS



AQUALAB

Laboratorio de Ciencias Naturales: Análisis de aguas, suelos y servicios afines
COVIDUC A-4 San Sebastian - Cusco
Telf. 271966 RUC.: 10238163001

INFORME DE ANALISIS DE AGUA

MUESTRA : AGUA SALADA DE MARAS

DISTRITO: MARAS

PROVINCIA: URUBAMBA

SOLICITA : CHELVI FELIX BUSTINZA

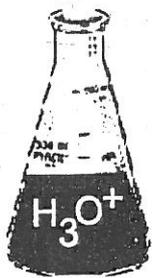
FECHA: 20/10/10

DETERMINACIONES

Dureza total CaCO_3	mg/L	6500
Alcalinidad total CaCO_3	mg/L	250
Acides Total CO_2	mg/L	99
Cloruros Cl	mg/L	387
Sulfatos SO_4	mg/L	6200
pH		7.1
Conductividad	uS/cm	-
Turbiedad	NTU	-

MARIO CUMPA CAYURI
INGENIERO QUIMICO
Reg. del Colegio de Ingenieros N°. 16199





AQUALAB

Laboratorio de Ciencias Naturales: Análisis de aguas, suelos y servicios afines
COVIDUC A-4 San Sebastian - Cusco
Telf. 271966 RUC.: 10238163001

INFORME DE ANALISIS DE AGUA

MUESTRA : AGUA DESTILADA POR RADICION SOLAR - SALINERA MARAS

DISTRITO: MARAS

PROVINCIA: URUBAMBA

SOLICITA : CHELVI FELIX BUSTINZA

FECHA: 29/10/10

DETERMINACIONES

Dureza total CaCO_3	mg/L	33
Alcalinidad total CaCO_3	mg/L	13
Acides Total CO_2	mg/L	6.6
Cloruros Cl	mg/L	25
Sulfatos SO_4	mg/L	7
pH		7.0
Conductividad	uS/cm	86.6
Turbiedad	NTU	1

MARIO CUMPA CAYURI
INGENIERO QUIMICO
reg. del Colegio de Ingenieros N° 16189

