



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE
MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TEMA:

**“VARIANTES DE DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR
SOLAR PLANO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA”**

Autor: Paredes Ojeda Jorge Antonio

Tutor: Torres Tamayo Enrique

LATACUNGA – ECUADOR

Junio – 2017



AVAL DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe del Proyecto de Investigación y Desarrollo de Posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el posgraduado: Ingeniero Jorge Antonio Paredes Ojeda, con el título del trabajo de investigación y desarrollo titulado: **“VARIANTES DE DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR PLANO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga Junio 9, 2017.

Para constancia firman:

PhD. SECUNDINO MARRERO RAMIREZ
NOMBRES Y APELLIDOS
cc:1757107907
PRESIDENTE

PhD. JUAN MATO TAMAYO
NOMBRES Y APELLIDOS
cc:1756944284
MIEMBRO

MSc. XAVIER ALFONSO PROAÑO MALDONADO
NOMBRES Y APELLIDO
cc:0502656424
MIEMBRO

MSc. EDWIN MARCELÓ LEMA GUAMAN
NOMBRES Y APELLIDOS
cc :0302241351
OPONENTE



RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS

El contenido de la presente Tesis de Grado, es original y de mi exclusiva responsabilidad.

Atentamente

Jorge Antonio Paredes Ojeda
C.I. 1100425410



AGRADECIMIENTO

Una expresión de gratitud muy sincera para el
PhD. Enrique Torres Tamayo por su decidida
colaboración



DEDICATORIA

A Isabel y Jorge Andrés,
por su confianza y apoyo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: “Variantes de Diseño de un Prototipo de Colector Solar Plano para el Mejoramiento de la Eficiencia Energética”

Autor: Ing. Jorge Paredes Ojeda

Tutor: PhD. Enrique Torres Tamayo

RESUMEN

Los colectores solares de placa plana, para calentamiento de agua constituyen una tecnología de bajo rendimiento, 60% máximo, la utilización de materiales inapropiados o de mala calidad ha sido la causa para que en el país no se utilice al máximo esta tecnología, tomando en cuenta que por ubicación geográfica el Ecuador se encuentra en una zona privilegiada para proyectos de energía solar. El cambio de fluido de trabajo por aire dio lugar al apareamiento de colectores solares de aire de placa plana, mejorar el rendimiento de estos sistemas, mediante la utilización de variantes de diseño de placas de cubiertas discontinuas, generadas por la unión de figuras geométricas construidas en material translúcido, constituye el propósito del presente trabajo de investigación. El tema es nuevo, tiene la particularidad que su costo no es elevado, porque se construye con placas delgadas de vidrio o botellas de cristal, no se han empleado en la placa absorbedora aleaciones metálicas especiales, de alta capacidad de calentamiento y baja emisión de la radiación de onda corta, así como la utilización de cristales de propiedades físicas especiales, como antirreflejo en la placa de cubierta. Las formas, materiales y dimensiones de las figuras son completamente aleatorias y se ha diseñado un modelo matemático basado en las leyes de la Termodinámica para analizar el rendimiento del modelo de placa plana simple y el rendimiento de las placas discontinuas, se lo hace mediante experimentación por comparación, se establece la configuración más eficiente y se proyecta una propuesta para



la elaboración de un prototipo. El análisis de la eficiencia se hace mediante estudio estadístico en el que se establecen criterios de aceptación y límites de confianza. La cubierta discontinua con geometría cuadrada es la que mejores resultados proporciona en el funcionamiento del colector solar de placas planas

DESCRIPTORES:

Placa absorbedora, variantes de diseño, eficiencia térmica.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
POSTGRADUATE DIRECTION
ENERGY MANAGEMENT MASTER'S DEGREE

Topic: “Design variants of a prototype flat solar collector for the improvement of energy efficiency”

Autor: Ing. Jorge Paredes Ojeda

Tutor: PhD. Enrique Torres Tamayo

ABSTRACT

Solar flat plate collectors for water heating technology are low yield, 60% maximum, the use of inappropriate materials or poor quality have been the cause for the country not used to the fullest this technology, taking in a count the geographical location that Ecuador is in a prime area for solar energy projects. The change of the working fluid by air led to the appearance of solar air collectors flat plate, improve the performance of these systems, by utilizing design variants of plates discontinuous roofing generated by the binding of geometric figures constructed in translucent material, is the purpose of present investigation work. The subject is new, has the peculiarity that its cost is not high, because it is constructed with thin glass plates or glass bottles, they have not been used in the absorber plate special metal alloys, high heat capacity and low emission of shortwave radiation and the use of crystals of special physical properties such as antiglare in the cover plate. The shapes, materials and dimensions of the figures are completely random and designed a mathematical model based on the laws of thermodynamics to analyze the performance model simple plate and performance of discrete plaques, it is done by experimentation, by comparing the most efficient configuration is established and a proposal for the development of a prototype project. The efficiency analysis is done by statistical study that acceptance criteria and confidence limits are set. The discontinuous



cover with square geometry is the one that gives better results in the operation of the flat plate solar collector

Descriptors:

Absorber plate, design variants, thermal efficiency



ÍNDICE GENERAL

PORTADA INTERNA	i
AVAL DEL TRIBUNAL DE GRADO	Error! Bookmark not defined.
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	viii
ÍNDICE GENERAL.....	x
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	Error! Bookmark not defined.i
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ÍNDICE DE CUADROS	ixx

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Situación problemática	3
Justificación de la investigación.....	5
Objeto y problema de la investigación	7
Campo de acción y objetivo general de la investigación.....	7
Hipótesis de investigación y desarrollo de la investigación	8
Desarrollo de la investigación:.....	8
Sistema de objetivos específicos.....	8
Sistema de tareas	9
Visión epistemológica de la investigación	9
CAPÍTULO I.....	10
MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO	10
1.1 Antecedente del estudio	10
1.2 Fundamentación legal	11
1.3 Fundamentación teórica	12
1.3.1 El Sol fuente de energía	13
1.3.2 Parámetros de radiación solar.....	14
1.3.3 Reflexión y refracción en la cubierta protectora	17



1.3.4	Mecanismo para conversión y transmisión de energía	21
1.3.5	Resistencias que se oponen al proceso térmico:	23
1.3.6	Colector solar de placas planas:	24
1.3.7	Configuración del prototipo	25
1.3.8	Modelo matemático	26
1.3.9	Análisis de las pérdidas exergéticas	28
1.3.10	Flujo de aire en colector solar de placa plana	32
CAPITULO II.....		35
METODOLOGÍA.....		35
2.1	Diagnóstico inicial	35
2.2	Diseño de la investigación.....	36
2.2.1	Condiciones geo-ambientales de la ciudad de Latacunga.....	37
2.2.2	Modalidad de la investigación.....	42
2.2.3	Tipos de investigación.	42
2.3	Métodos de investigación.....	42
2.3.1	Método de Observación	42
2.3.2	Método de medición	42
2.4	Experimentación científica.....	43
2.4.1	Plan de experimentación factorial	44
2.5	Instrumentos	46
2.5.1	Piranómetro:	47



2.5.2	Termo anemómetro:.....	47
2.5.3	Ventilador:	48
2.5.4	Termómetro infrarrojo FLUKE 62max +:.....	48
2.5.5	Medidor de temperaturas mediante termocupla:.....	49
2.5.6	Aislante Térmico	49
2.5.7	Placa de cubierta.....	49
2.5.8	Placa absorbente	50
2.6	Cubiertas discontinuas	50
CAPITULO III		52
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		52
3.1	Calentamiento de la placa absorvedora.....	52
3.2	Flujo de aire caliente	54
3.3	Cálculo del rendimiento η_{II}	65
3.4	Análisis estadístico de la tabla de rendimientos	67
CONCLUSIONES		70
RECOMENDACIONES		72
CAPITULO IV		74
PROPUESTA		74
4.1	TÍTULO	74
4.2	JUSTIFICACIÓN	74



4.3	OBJETIVO GENERAL	75
4.3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	75
4.4	ESTRUCTURA DE LA PROPUESTA	75
4.5	DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	76
4.5.1	Operacionalidad	76
4.5.2	Tipo de colector solar.....	77
4.5.3	Capacidad de producción de aire caliente.....	78
4.5.4	Materiales y costos unitarios de producción	79
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
	ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Red de Categorías	12
Figura 2: Curva estándar de la radiación solar extraterrestre	13
Figura 3. Ángulos de un rayo solar incidente.....	14
Figura 4. Descomposición de la radiación solar en una superficie translúcida.....	15
Figura 5. Reflexión especular	16
Figura 6. Reflexión difusa	16
Figura 7. Reflexión general	16
Figura 8. Reflexión y refracción.....	17
Figura 9. Polarización de la luz	19
Figura 10. Variación del coeficiente de reflexión	20
Figura 11. Efecto invernadero dentro del colector	22
Figura 12. Pérdidas térmicas en un colector solar	22
Figura 13. Resistencias térmicas en un colector solar	23
Figura 14. Estructura básica de un colector solar de aire.....	24
Figura 15. Flujos de exergía en un colector solar de aire.....	29
Figura 16. Atlas solar del Ecuador.....	36
Figura 17. Temperaturas máximas y mínimas medias para los próximos 14 días	38
Figura 18. Presión atmosférica para los próximos 14 días.....	39
Figura 19. Velocidad del viento para los próximos 14 días	39



Figura 20. Humedad relativa (%) para los próximos 14 días	40
Figura 21. Medidor de radiación solar	47
Figura 22. Termo anemómetro	47
Figura 23. Ventilador	48
Figura 24. Termómetro infrarrojo.....	48
Figura 25. Multímetro digital	49
Figura 26. Cubiertas discontinuas.....	50
Figura 27. Reflexión en las figuras geométricas de la placa discontinua	51
Figura 28. Trayectoria diaria del sol en Latacunga	51
Figura 29. Rendimiento vs Temperatura de salida	66
Figura 30. Secador solar indirecto	76



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variación de temperatura en Latacunga en el año 2016.....	37
Tabla 2. Histórico climático para la ciudad de Latacunga	38
Tabla 3. Zonas de irradiación solar en el Ecuador.....	40
Tabla 4. Valores promedio de irradiación solar en las provincias del Ecuador	41
Tabla 5. Plan de bloques	46
Tabla 6. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 1	55
Tabla 7. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 1	55
Tabla 8. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 1	56
Tabla 9. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 1	56
Tabla 10. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 2	57
Tabla 11. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 2	57
Tabla 12. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 2	58
Tabla 13. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 2	58
Tabla 14. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 3	59
Tabla 15. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 3	59
Tabla 16. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 3	60
Tabla 17. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 3	60
Tabla 18. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 4	61



Tabla 19. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 4	61
Tabla 20. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 4	62
Tabla 21. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 4	62
Tabla 22. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 5	63
Tabla 23. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 5	63
Tabla 24. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 5	64
Tabla 25. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 5	64
Tabla 26. Rendimientos	66
Tabla 27. Totales y medias	67



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.....	4
Cuadro 2.....	52
Cuadro 3.....	53
Cuadro 4.....	53
Cuadro 5.....	53
Cuadro 6.....	54
Cuadro 7.....	79
Cuadro 8.....	79
Cuadro 9.....	79
Cuadro 10.....	80
Cuadro 11.....	80



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

INTRODUCCIÓN

En el umbral del siglo XXI, la totalidad del planeta Tierra se enfrenta severas e inesperadas manifestaciones de un moderno fenómeno atmosférico denominado “Cambio Climático”: según la World Wildlife Foundation (WWF), las características principales son: aumento del nivel del agua en el mar, lluvias torrenciales que causan inundaciones y deslaves, sequías, olas de calor y tormentas asesinas en los lugares más insospechados del planeta.

A nivel mundial, las voces más autorizadas aseguran que la gran acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, constituye la causa principal del Cambio Climático, irrefutablemente se tiene que reconocer que la presencia de éstos se deben a las principales actividades antrópicas, transporte e industria.

El hombre en sus inicios sobre la tierra combustionó materiales, madera y carbón, para cocer sus alimentos y luchar contra el frío. Posteriormente en la época de la industrialización, siglos IXX y XX, con el desarrollo de ciencia y tecnología se fabrican todo tipo de maquinarias y equipos, en los que la característica fundamental de la mayor parte de ellos, es el abastecimiento de energía mediante procesos de combustión en forma exclusiva, el proceso de combustión se analiza y desarrolla tan profundamente, al punto que llega a constituir el paradigma energético mundial. “La capacidad de dominio e industrialización del fuego es sinónimo de avance en cualquier civilización”, para algunos eruditos en el campo de la energía. Los combustibles utilizados en las máquinas muestran un ciclo cronológico basado en el mayor grado de poder calorífico, debido a ello pasan de la madera al carbón mineral, luego los combustibles fósiles y finalmente aunque en menor escala, la energía nuclear.

La subsistencia del hombre en las colectividades modernas requiere cuantiosos montos de energía, generalmente ésta proviene del petróleo, pero se conoce que, las fuentes de combustibles fósiles se extinguen y su utilización provoca severas complicaciones en la ecología y medioambiente.

En el mundo industrializado gran parte de la energía proviene de centrales nucleares, las que actualmente están siendo desechadas debido a: peligro de explosión de los recipientes, elevados costos operacionales y la extremada dificultad que constituye el manejo de los residuos contaminantes. La sociedad actual en el campo de la energía se enfrenta a un gran dilema y enorme desafío, encontrar y explotar fuentes de energías alternativas no contaminantes, o sea elegir y procesar la energía necesaria para el normal desarrollo en fuentes como: radiación solar, fuerza del viento, potencial hidráulico de los ríos, potencial energético de las olas del mar (energía mareomotriz) y los depósitos de vapor bajo la superficie (energía geotérmica).

La radiación solar, es un recurso natural que llega con diversas intensidades a todos los lugares del planeta. Los países ubicados entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio tienen una ubicación geográfica privilegiada, mediante una revisión de literatura especializada se puede establecer que la radiación solar tiene valores de intensidad altos, por ejemplo: Ecuador 5.2 kWh / m², Costa Rica 5.1 kWh / m², México 5.13 kWh / m², otros países fuera de la zona como: Alemania 3.8 kWh /m², Israel 3.5 kWh/m², sin embargo en la primera región citada el desarrollo de la tecnología solar es incipiente, mientras que en los otros países, a pesar del bajo nivel de radiación, el desarrollo de la tecnología solar es muy elevado.

Desde otro punto de vista la pobreza y falta de empleo son condiciones palpables para estratos básicos de las poblaciones de los países entre los trópicos antes mencionados; paralelamente la región goza de solo dos estaciones climatológicas que no se caracterizan por presentar valores extremos, posee gran variedad de frutas, vegetales, especies aromáticas y cereales que se producen en épocas especiales del año. El carácter de estacional, la corta vida pos cosecha y la falta de alternabilidad de la producción agrícola hacen que esta actividad no sea económicamente rentable en la región, es necesario buscar alternativas para la solución de los problemas mencionados. La iniciativa de la UNESCO, “Los proyectos de todo tipo deben estar relacionados con la búsqueda de alternativas de lucha contra la pobreza y protección del medio ambiente”, cobra vigencia y parece ser la más adecuada.

El aprovechamiento de la energía solar tiene dos tipos de equipo principales, los que convierten la energía luminosa del Sol en energía eléctrica, denominados equipos fotovoltaicos y los equipos térmicos que convierten a la energía lumínica del sol en energía térmica. En el presente proyecto se analiza el colector solar de aire placa plana con cubierta continua, básicamente está conformado por dos placas planas dispuestas en forma paralela: en la parte superior “la placa de cubierta”, constituida por una plancha lisa y continua de material translúcido que permite el paso de la luz solar y en el fondo una plancha metálica lisa de aluminio, denominada “placa absorbadora” que se encarga de almacenar la energía térmica; en el fondo y los laterales del rectángulo que configura la sección transversal del colector solar, se deposita aislante térmico a base de fibra de espuma de poliuretano; debido a la baja densidad, pequeña capacidad calorífica y escasa conductividad térmica del aire, el colector se diseña como uno de paso aire a través de la placa absorbadora, esto es un doble flujo, por encima y por debajo de ella, el flujo de aire en estas regiones se calienta por efecto de la convección y radiación de calor de la placa absorbadora.

Situación problemática

En el Ecuador generalmente la actividad agrícola de pequeños productores, no es rentable y provoca estratos de pobreza porque no está lo suficientemente tecnificada. En la Región Tres, donde se localiza el presente proyecto de investigación, los pequeños agricultores producen al secado y en forma tradicional, en esta condición el valor agregado que se puede dar a las cosechas es mínimo, entre otras, una solución colaborativa al problema es incrementar el valor agregado y el tiempo de vida útil de los productos mediante procesos de deshidratación, empleando equipos de bajo costo que utilicen energía solar.

En el proceso de deshidratado de especies vegetales, prevalecen dos tipologías: la de baja temperatura que emplea aire precalentado con temperaturas de 3 – 5°C por encima de la temperatura ambiente, en ésta, el tiempo de secado es muy largo y propenso al desarrollo de hongos que perjudican la calidad del producto y la de secado de alta temperatura que emplea aire a temperaturas de 10°C o más sobre la temperatura ambiente, en la que los tiempos son considerablemente menores.

En diversas revisiones de literatura especializada, se ha podido detectar que el rendimiento térmico de un colector solar depende en gran medida del calentamiento de la placa absorbadora, según análisis de expertos como Nandwany y otros en los colectores solares para calentamiento de agua se obtienen temperaturas del fluido de 65 – 90 °C, con rendimientos térmicos del colector de 40 – 60 %, para los colectores de aire se estima el rendimiento del 50 – 60 %.

En el funcionamiento del colector solar de aire placa plana se deben considerar las siguientes condiciones: la intensidad de la radiación solar no es invariable durante el día, está en función del día del año, de la hora y de la latitud del lugar. Además, el monto de radiación solar a acumular depende de la ubicación del dispositivo receptor. Las corrientes de viento de acuerdo a su intensidad y velocidad enfrían en mayor o menor grado la placa de cubierta, con la utilización de placas discontinuas se pretende mantener constante la temperatura de la placa de cubierta. La temperatura del aire a la salida del colector va a depender del flujo másico que circula, el flujo másico es función de la velocidad de giro del motor del ventilador. Las tres variables independientes descritas son las que inciden en forma más significativa en la variable dependiente, como se indica en cuadro adjunto.

VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLE DEPENDIENTE
Forma geométrica de la cubierta plana	Eficiencia del colector solar de placas planas
Nivel de radiación solar incidente	
Flujo másico de aire que atraviesa el colector	

Cuadro 1.

Las variables seleccionadas son las principales, existen otras variables secundarias que si bien inciden en el funcionamiento del colector solar de placas planas, su efecto sobre la eficiencia del colector no es tan significativo y puede determinarse mediante el modelo matemático, por ejemplo la presión atmosférica del lugar.

Justificación de la investigación

El estado del arte en el mejoramiento de la eficiencia de los colectores solares de aire placa plana, de acuerdo a una exhaustiva investigación bibliográfica para las dos últimas décadas se puede afirmar que la investigación se dedica en gran parte al análisis de la placa absorbedora, la que puede ser lisa o con aletas, los primeros investigadores (Parker, B., Lindley, M., Colliver, D., y Murphy, E. 1993) presentan un colector con placa absorbedora de aluminio lisa pintada de color negro brillante con flujo de aire por la parte superior e inferior de la placa absorbedora, con un rendimiento del 65.60%. (Ong,1995) analiza un colector solar de doble placa absorbedora y obtienen un rendimiento del 68.50%. (Mohamad, A.1997) presentan un colector solar con placa absorbedora porosa con un rendimiento del 75%. (Álvarez, G., Simá, E., y Lira, L. 2000) analizan un colector solar con lámina absorbedora de acero calibre 24, utilizando la norma ASHRAE 93-77 obteniendo una eficiencia del 54.5%. (Cengiz, Y., Inci, T., Celal, S., y Dursum, P.2002) analizan un colector con doble placa, una placa delgada de hierro pintada de color negro mate y otra placa de cobre perforada colocada en forma diagonal a la placa de fondo y con una inclinación de 19°, la eficiencia máxima fue del 70%, para un flujo de aire de 65 m³/h. (Álvarez, G., Arce, J.,y Heras, M.2004) buscando colectores solares de costo razonable utilizan para la construcción de la placa absorbedora tarros de aluminio provenientes de gaseosas, varían el valor del flujo másico, y comprueban que el espesor del aislamiento no tiene influencia en el rendimiento que fue del 74%. (Irfan, K.,y Aydin, D. 2004) analizan un colector solar con doble placa absorbedora, en este caso la placa es de aluminio ondulada con separación de 25 mm entre placas, la eficiencia lograda es del 67%. (Turhan, K. 2006) cambia la placa de cubierta de vidrio por plástico translúcido y la placa absorbedora de aluminio antideslizante pintada de negro, obtuvo un rendimiento del 48%. Para la placa con aletas, (Ammari,H. 2003) presenta un modelo de colector con cubierta y placa absorbedora plana que ocupa tablillas metálicas entre las dos placas, obtuvo un rendimiento 10% superior al colector de aire común. (Moumami, N., Youcef-Ali, S., Moumami, A., y Desmons, J. 2004) para mejorar la eficiencia crearon un flujo turbulento progresivo utilizando aletas colocadas sobre la placa absorbedora en forma perpendicular al flujo, la cubierta fue de policarbonato transparente y la placa absorbedora de aluminio, obtienen un rendimiento del 68.8%. (Hikmet, E. 2008) agrega obstáculos en el canal de flujo, empleando acero inoxidable, obtuvo un rendimiento del 61%.

Otros estudios sobre la placa de cubierta cambian el material de vidrio normal, por vidrio antirreflejo y últimamente se ha colocado una lámina de plástico porosa en forma hexagonal en la parte inferior de la cubierta. Como se puede advertir existe información de variaciones al diseño de la placa absorbadora, al interior de la placa de cubierta, pero a pesar de una exhaustiva búsqueda no se encuentran análisis sobre la cubierta, como propone el presente estudio de investigación.

A nivel nacional existe la necesidad de lograr un desarrollo más sustentable para el país, ya que es una necesidad la transformación de la actual matriz energética, que presenta varias y complicadas falencias como su alta dependencia en la energía no renovable, que según (Evanz, J., y Schiller, S. 2013) es del 98%. La agroindustria industria nacional requiere procesos de secado, de materiales como madera, así como deshidratación de frutas y especies vegetales. Un mecanismo térmico constituido por un colector solar de mayor eficiencia podría permitir la reducción de tiempos en los procesos de secado y de esta forma aliviar en gran medida las cuantiosas pérdidas de los agricultores por la pérdida de los excedentes de cosecha.

La relevancia contemporánea del proyecto está en la utilización de la energía solar como fuente alternativa para lograr la disminución en la utilización de combustibles fósiles, con lo que se lograría un mejor cuidado del medio ambiente, restringiendo la presencia de los gases de efecto invernadero. Desde otro punto de vista en el Ecuador existe el sector de la pequeña industria agrícola, sector pobre, deprimido y desprovisto de tecnología, a ellos les sería de gran ayuda un secador solar de eficiencia mejorada y bajo costo.

La relevancia e innovación tecnológica del proyecto consiste en operar sobre el exterior de la placa plana de cubierta, mediante la aplicación de diversas cubiertas planas discontinuas, éstas están conformadas por elementos translúcidos construidos en láminas de vidrio delgado, 3 mm de espesor, que presentan diversas configuraciones geométricas: hexágonos, triángulos, cuadrados y anillos cilíndricos. La unión de las láminas para formar las figuras geométricas se hace con masilla epóxica de bajo costo.

Funciones de la sobre-placa discontinua:

- 1). Incrementar la masa de la placa de cubierta, lo que implica que ésta no puede ser enfriada en corto tiempo.
- 2). Las figuras geométricas son espacios cerrados en las paredes de los cuales se produce una segunda reflexión de los rayos reflejados por la placa de cubierta, obligándolos a entrar de nuevo a la placa de cubierta.
- 3). La discontinuidad de la placa de cubierta reduce significativamente el área de contacto con la corriente de viento, por tanto, las pérdidas de calor por convección van a ser de mucho menor tamaño que en el caso de la placa continua.

El proyecto tiene relevancia científica porque a partir de los resultados que se obtengan con la utilización de las placas discontinuas, se podrían enunciar modernas teorías, patrones y planteamientos teóricos, destinados a prever y revelar las condiciones y modelos que logren un funcionamiento más eficiente de los colectores solares planos.

Objeto y problema de la investigación

Constituye el objeto de la de investigación “los calentadores solares de placa plana”

El problema de la investigación es: “¿Cómo inciden las sobre-cubiertas de geometría discontinua colocadas sobre la placa de cubierta, en la eficiencia energética de los colectores solares de aire placa plana?”

Campo de acción y objetivo general de la investigación

El campo de acción es: “Calentamiento de aire mediante energía solar en colectores solares placa plana”

El objetivo de la investigación es: “Proponer variantes de diseño de un colector solar plano para el logro de mayor eficiencia energética.”

Hipótesis de investigación y desarrollo de la investigación

La hipótesis de investigación es: “La utilización de cubiertas superficialmente discontinuas en la placa de cubierta de colectores solares de aire placa plana, mejorará la eficiencia energética de estos equipos en la Universidad Técnica de Cotopaxi, en el año 2017”.

Diseño del experimento

- En primera instancia se utiliza el colector solar de aire placa plana con la cubierta exterior continua libre, debido a que la diferencia de densidades entre el aire a temperatura ambiente y el aire dentro del colector no es muy grande como para provocar un movimiento de éste al exterior, se utiliza un ventilador para impulso, dicho dispositivo tiene 7 niveles de flujo, se evalúa el rendimiento para cada nivel de flujo mediante la utilización de un modelo matemático apropiado.
- A continuación se coloca una de las placas discontinuas y se determina el nivel de eficiencia para cada nivel de flujo, utilizando el mismo modelo matemático.
- Se realizan siete pruebas una por cada nivel de flujo del ventilador y tipo de cubierta discontinua y cinco repeticiones del proceso, para tener un nivel estadístico de seguridad.
- Finalmente se determina por comparación el modelo de placa plana discontinua que es el que mejor rendimiento produce.

Sistema de objetivos específicos

- Establecer un proceso técnico que mediante la utilización de un modelo matemático apropiado, permita cuantificar la eficiencia del colector solar con placa plana simple y la eficiencia del colector con placa discontinua, considerando las irreversibilidades del proceso.
- Averiguar las condiciones geográficas, los valores promedio y valores históricos de: temperatura ambiente, velocidad del viento y nivel de radiación solar de la ciudad de Latacunga.
- Construir mediante un diseño apropiado un colector solar plano, con placa plana de cubierta, al que se pueda sobreponer una sobre placa discontinua.

Sistema de tareas

- Determinar condiciones meteorológicas en Latacunga: Nivel de radiación solar: medición mediante piranómetro y comparación con los valores establecidos en el atlas solar del Ecuador. Determinar la temperatura ambiente y velocidad del viento: se establecen mediante la consulta a publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMI, las temperaturas máxima y mínimas mes a mes del año próximo pasado y el histórico de los últimos diez años. Determinar valores medios para los próximos 14 días de: Presión atmosférica, humedad relativa y velocidad del viento, mediante la investigación en páginas meteorológicas.
- Determinar un modelo matemático apropiado que permita el análisis de las eficiencias en diversas condiciones de la placa de cubierta.
- Configurar el diseño experimental, tomando en consideración las variables de entrada y salida y el número de experimentos que deban realizarse para tener seguridad estadística en los resultados.
- Presentar gráficas de funcionamiento.
- Diseñar el prototipo de colector solar de aire placa plana, tomando en consideración las condiciones geográficas y ambientales de la zona donde va a ser utilizado, así como las condiciones térmicas de funcionamiento y aislamiento, con estos datos elaborar los planos de construcción y montaje.

Visión epistemológica de la investigación

Nivel de investigación: la modalidad y nivel de investigación será explicativos porque en todo momento se trata de explicar la causa de los bajos niveles de eficiencia en los colectores solares de aire placa plana, mediante el establecimiento de relaciones causa – efecto.

Según el diseño la investigación será experimental, un proceso en el que se somete a un colector solar de aire placa plana a determinadas condiciones de las variantes de diseño en la placa de cubierta (variable independiente) para observar los efectos que se producen en el nivel de eficiencia (variable dependiente)

CAPÍTULO I

MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO

1.1 Antecedente del estudio

Los autores: (Ávila, Mendoza y Beltrán, 2010), mediante la ejecución de dos procedimientos analizan el funcionamiento del colector de placa plana; inicialmente desarrollan un modelo físico-matemático a partir de los balances de energía, para posteriormente construir y probar in situ, un prototipo de colector de placa plana construido en madera, con placa colectora metálica y cubierta protectora de doble capa de vidrio transparente, equipado además con un ventilador centrífugo para remover el aire caliente e instrumentos de medición de temperatura del aire a la entrada y salida del colector, nivel de radiación solar y flujo másico del aire, durante aproximadamente 6 horas por varios días y bajo distintas condiciones climáticas de la ciudad de Montería, Córdoba, Colombia; con estos datos y las fórmulas del modelo matemático preestablecido, determinan el valor de la eficiencia energética del prototipo.

El tema expuesto guarda similitud en parte con el estudio que se propone desarrollar, similar en cuanto tiene relación al procedimiento general, análisis termodinámico de los balances de energía, desarrollo del modelo físico-matemático y determinación del rendimiento en forma experimental del prototipo; cambia en lo que tiene que ver con la placa de cubierta, ellos emplean doble capa plana de vidrio, aquí se emplearán “las variantes de diseño” constituidas por una placa plana a la que se superpone una placa discontinua, conformada por un conjunto de elementos translúcidos de diferente configuración geométrica.

1.2 Fundamentación legal

En el Ecuador varias entidades inciden en el establecimiento del marco legal e institucional, mediante Políticas de Estado relacionadas con las Energías Renovables, para el desarrollo sustentable del Sector Energético, entre ellas están: Gobierno Nacional, Asamblea Nacional, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables MEER, Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) y Ministerio de Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC).

Las instituciones mencionadas han elaborado varios instrumentos legales, entre ellos, los más significativas son: “Constitución del Ecuador 2008”, “Plan Nacional del Buen Vivir” y “Políticas Energéticas del Ecuador 2008-2020” que en este estudio se consideran fuentes de información, los considerandos y decretos expuestos guardan alta similitud, todos están enfocados a la no afectación al medio ambiente, seguridad alimentaria, derecho al agua y algunos temas más, a continuación se presentan algunas citas relativas al tema.

“El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua”. Constitución del Ecuador 2008, Artículo 15

“El estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas, ni el derecho al agua”. Artículo 413 Título VI: Régimen de desarrollo, Capítulo V: Sectores estratégicos, servicios y empresas públicas.

“Diversificar la matriz energética nacional, promoviendo la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles” Plan Nacional del Buen Vivir 2013- 2017

- “c) Impulsar un modelo de desarrollo energético con tecnologías ambientalmente amigables.”

- “d) Formular y llevar adelante un Plan Energético Nacional, que defina la expansión optimizada del sector en el marco del desarrollo sostenible”.
 - “f) Promover el desarrollo sustentable de los recursos energéticos e impulsar proyectos con fuentes de generación renovable (hidroeléctrica, geotérmica, solar y eólica) y de una nueva generación eléctrica eficiente, incluyendo la nuclear, excluyendo la generación con base en el uso del diésel”.
 - “n) Reducir el consumo de combustibles en el transporte mediante la sustitución por gas natural comprimido GNC, electricidad y la introducción de tecnologías híbridas.”
- Políticas Energéticas del Ecuador 2008-2020

1.3 Fundamentación teórica

El estudio considera dos tópicos de investigación, la formulación del modelo matemático, que explica el fenómeno del calentamiento solar, estudio relacionado con temas de Ingeniería Mecánica como: análisis termodinámico del calentamiento, investigación de la reflexión luminosa en superficies sólidas continuas y discontinuas; como se puede advertir todos los temas se relacionan con la variable independiente: las variantes de diseño. La otra sección es una investigación de la variable dependiente, toma en cuenta, las energías renovables, entre ellas la solar, la forma de aprovecharla mediante paneles solares planos, para terminar con el estudio de la eficiencia de éstos. Las dos variables se relacionan en una superordinación de categorías, como se indica en la figura siguiente:

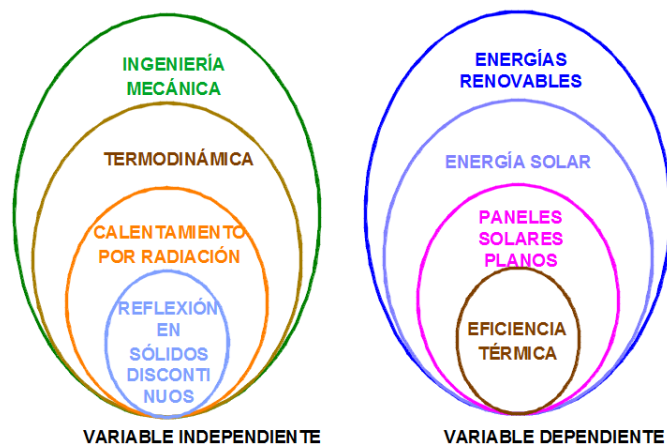


Figura 1: Red de Categorías

Fuente: Elaboración propia

1.3.1 El Sol fuente de energía

En una revisión de literatura técnica actualizada en relación con la radiación solar, son varios los autores consideran al Sol una esfera de $13.9 \cdot 10^5$ km de diámetro, en cuyo núcleo existen gases retenidos por enormes fuerzas de tipo gravitatorio, el conjunto puede ser equiparable a un gigantesco reactor en el que las reacciones de fusión generan ondas de radiación electromagnética, que atraviesan el espacio y llegan hasta la Tierra. Los rayos solares, son ondas electromagnéticas, de características físicas especiales

En aplicaciones de energía solar térmica, es importante distinguir al menos dos regiones espectrales: la región de onda corta en la que la longitud de onda está entre $0.2 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$ y la región de onda larga en la que la longitud de onda está entre $2 \mu\text{m}$ y $20 \mu\text{m}$, aproximadamente el 94% de la radiación solar se encuentra en la región de onda corta $\lambda < 2 \mu\text{m}$. (Fernández, 2012, pp. 18)

Algunas teorías termodinámicas, asocian temperaturas elevadas con radiaciones de onda corta, y bajas con emisiones de onda larga. Generalmente la interacción entre la radiación electromagnética y los distintos medios depende en forma exclusiva de la longitud de onda de la radiación incidente; en la radiación solar predominan las longitudes de onda entre $0.38 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$ como muestra la figura siguiente:

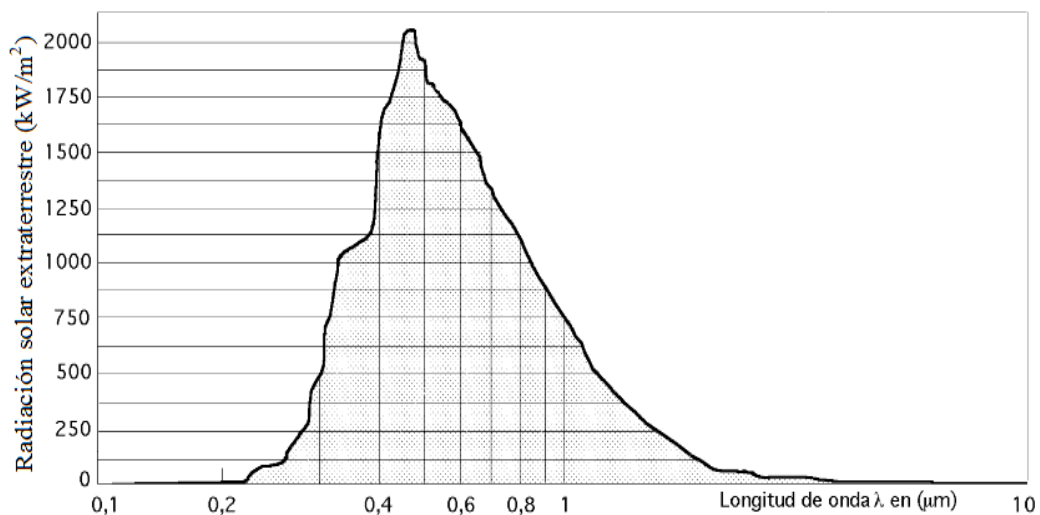


Figura 2: Curva estándar de la radiación solar extraterrestre

Fuente: (Fernández, 2012)

En general, la longitud de onda de la radiación incidente, determina los valores de las propiedades ópticas de los materiales, al punto que, muchos autores consideran toda una “dependencia espectral”. “Una placa de vidrio transmite el 90% de la energía de onda corta incidente, absorbe máximo el 2% y permite el paso de solamente el 8% de la radiación de onda larga”. (Zabala, 2009). En placas metálicas éstas absorben prácticamente toda la radiación de onda corta incidente, pero constituyen un pobre emisor de radiación de onda larga.

1.3.2 Parámetros de radiación solar

El análisis del funcionamiento de los colectores solares planos requiere de la definición de algunos parámetros de operación que aparecen en el modelo matemático, de acuerdo a la figura se definen los siguientes ángulos:

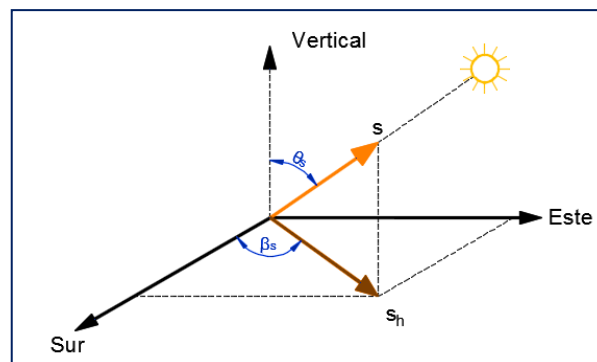


Figura 3. Ángulos de un rayo solar incidente
Fuente: Elaboración propia

$\theta_s \equiv$ ángulo cenital del sol, formado por el rayo de luz solar y la vertical en el punto de incidencia de aquel.

$\beta_s \equiv$ ángulo entre la proyección del rayo de luz solar incidente en el plano horizontal y el eje Norte – Sur.

Transmitancia τ \equiv la transmitancia óptica constituye la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo en determinada longitud de onda, se expresa como la relación entre la energía luminosa incidente total H_t y la cantidad que atraviesa el cuerpo H .

$$\tau_{\lambda} = \frac{H}{H_i} \quad [1]$$

Donde:

τ \equiv Transmitancia

λ \equiv Longitud de onda

H \equiv Energía luminosa que atraviesa el cuerpo translúcido

H_i \equiv Energía luminosa incidente

Absorbancia α \equiv es la cantidad de energía retenida por un cuerpo translúcido cuando sobre él incide en forma de rayo luminoso, la absorbancia para una determinada longitud de onda se define como:

$$\alpha_{\lambda} = -\log_{10} \frac{H}{H_i} \quad [2]$$

Reflectividad \equiv En general se conceptualiza como el monto de radiación incidente reflejada por una superficie. Diversos autores recomiendan que debe ser tratada como una propiedad direccional dependiente de la dirección y longitud de onda de la radiación incidente y de la dirección de la radiación reflejada, para superficies translúcidas la radiación incidente se descompone en la forma que indica la figura siguiente.

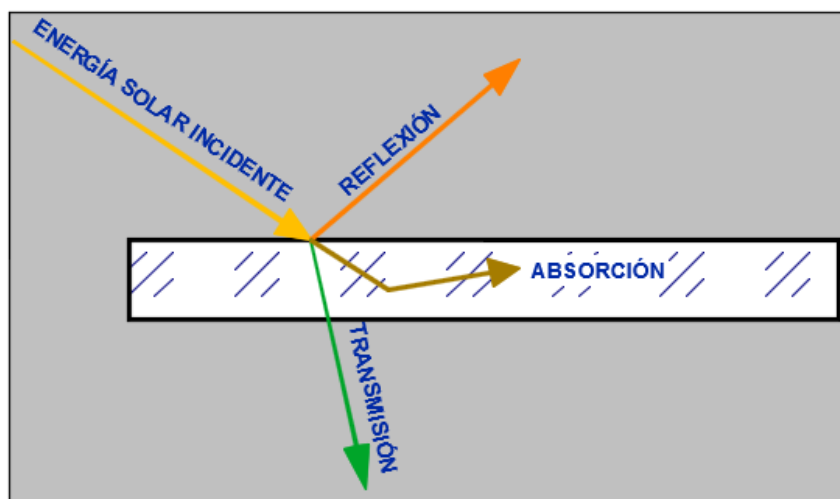


Figura 4. Descomposición de la radiación solar en una superficie translúcida

Fuente: Elaboración propia

Según Fernández 2012, Existen tres tipos de radiación reflejada: especular, difusa y general, como se indica en las siguientes figuras.

Reflexión especular: aquella en la que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, en ella el rayo incidente, el reflejado y la normal son coplanarios.

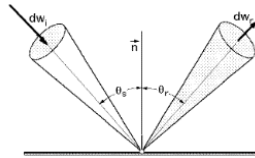


Figura 5. Reflexión especular

Fuente: (Fernández 2012)

Reflexión difusa: elimina todas las características de la radiación incidente, distribuyendo la radiación en todas las direcciones.

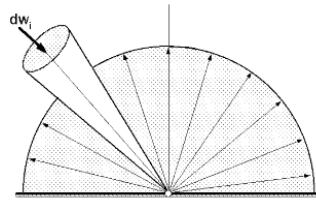


Figura 6. Reflexión difusa

Fuente: (Fernández 2012)

Reflexión general: participa de los dos tipos anteriores de reflexión con la particularidad que en algunos lugares es más intensa que en otros

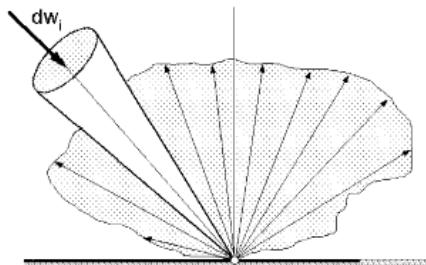


Figura 7. Reflexión general

Fuente: (Fernández 2012)

Reflectividad difusa ρ \equiv el tipo más común de reflectividad, se forma cuando la luz toca superficies ásperas, éstas ocasionan rayos reflejados que se dispersan en todas direcciones, solo una pequeña cantidad de luz es reflejada de regreso a la fuente

1.3.3 Reflexión y refracción en la cubierta protectora

Cuando la radiación electromagnética incide en la interfaz de dos medios con diferentes propiedades ópticas, una parte es transmitida y otra reflejada, como se indica en la figura siguiente:

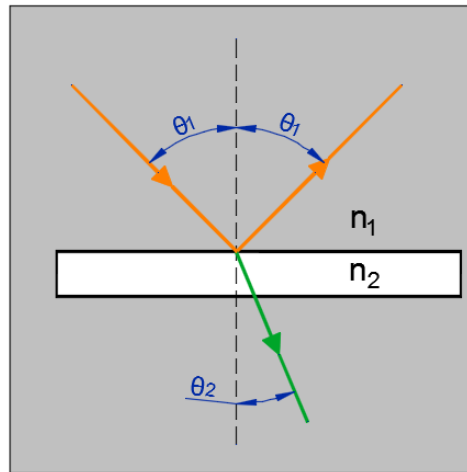


Figura 8. Reflexión y refracción

Fuente: Elaboración propia

Despreciando la cantidad de radiación retenida en la placa por ser muy pequeña y considerando reflexión especular, se puede decir que el flujo de energía incidente F_i es igual a la suma de la energía reflejada F_r más la energía transmitida F_t , lo que puede expresarse matemáticamente como:

$$F_i = F_r + F_t \quad [3]$$

Si se divide la fórmula [3] para F_i se tiene:

$$\frac{F_i}{F_i} = \frac{F_r}{F_i} + \frac{F_t}{F_i} \quad \text{considerando : } r = \frac{F_r}{F_i} \text{ y } t = \frac{F_t}{F_i} \text{ se puede escribir:}$$

$$r + t = 1 \quad [4]$$

Donde

$r \equiv$ coeficiente de reflexión

$t \equiv$ coeficiente de transmisión

Los valores de los coeficientes r y t siempre están entre 0 y 1. La refracción de la luz se produce entre dos medios en los cuales viaja a diferente velocidad, para este caso el vidrio y el aire, según la ley de Snell, la componente horizontal de la energía incidente y de la transmitida es constante y puede escribirse así:

$$n_1 * \text{sen} \theta_1 = n_2 * \text{sen} \theta_2 \quad [5]$$

Donde:

n_1 y $n_2 \equiv$ son los índices de refracción en cada medio

$\theta_1 \equiv$ ángulo de incidencia entre la dirección del rayo incidente y la normal

$\theta_2 \equiv$ ángulo entre la dirección del rayo refractado y la normal

El índice de refracción en un medio semitransparente es el cociente de dividir la velocidad de la luz en el vacío C , para la velocidad de propagación de la luz en el medio V_λ , que para los medios dispersivos depende de la longitud de onda λ

$$n_\lambda = \frac{C}{V_\lambda} \quad [6]$$

Para la luz solar el índice de refracción del aire coincide con el índice de refracción del vacío ($n = 1$). Para el vidrio el índice de refracción no depende apreciablemente de la longitud de onda sino del tipo de vidrio, para el vidrio común ($n = 1.52$).

En la interfaz, la cantidad de energía reflejada depende de los siguientes parámetros: índice de refracción de los medios, ángulo de incidencia y estado de polarización de la luz; la luz solar se considera una radiación electromagnética, o sea una onda transversal sujeta a polarización la misma que se resuelve en dos direcciones, una perpendicular (β) y otra paralela (\parallel) al plano de la interface, la energía reflejada puede cuantificarse a través de la fórmulas de Fresnel.

$$r_{\perp} = \left[\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right]^2 \quad [7]$$

$$r_{\parallel} = \left[\frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right]^2 \quad [8]$$

Según Abal 2013, la radiación solar incidente está compuesta por luz no polarizada (es decir 50% del flujo incidente tiene polarización \parallel y 50 % polarización \perp), como indica la figura: por lo que el coeficiente de reflexión en la interfaz se obtiene el efecto de ambas componentes de polarización en partes iguales

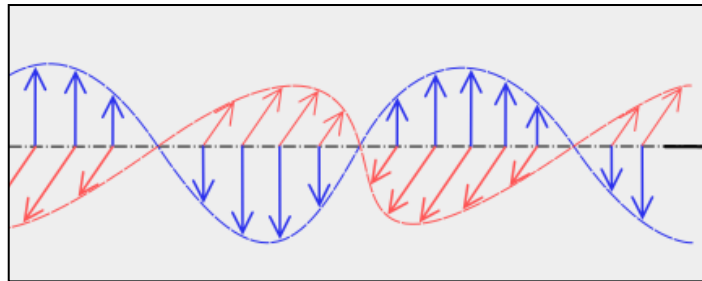


Figura 9. Polarización de la luz

Fuente: (Serway, 2008)

Debido a lo anterior en el coeficiente de reflexión en la interfaz se obtiene el efecto de ambas componentes de polarización en partes iguales

$$\bar{r} = \frac{1}{2} (r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad [9]$$

Tomando en consideración que la energía que no se refleja se transmite al medio 2 en este caso la cámara de aire que separa a la cubierta protectora y la placa absorbedora, aquí el coeficiente de transmisión no es independiente sino que se satisface las relaciones ($t_{\perp} = 1 - r_{\perp}$) y ($t_{\parallel} = 1 - r_{\parallel}$), con ello se puede escribir que el coeficiente de transmisión medio para luz no polarizada es:

$$\bar{t} = \frac{1}{2} (t_{\perp} + t_{\parallel}) = 1 - \bar{r} \quad [10]$$

Tanto el coeficiente de reflexión r como el de transmisión t varían con el ángulo de incidencia como se indica en la figura siguiente:

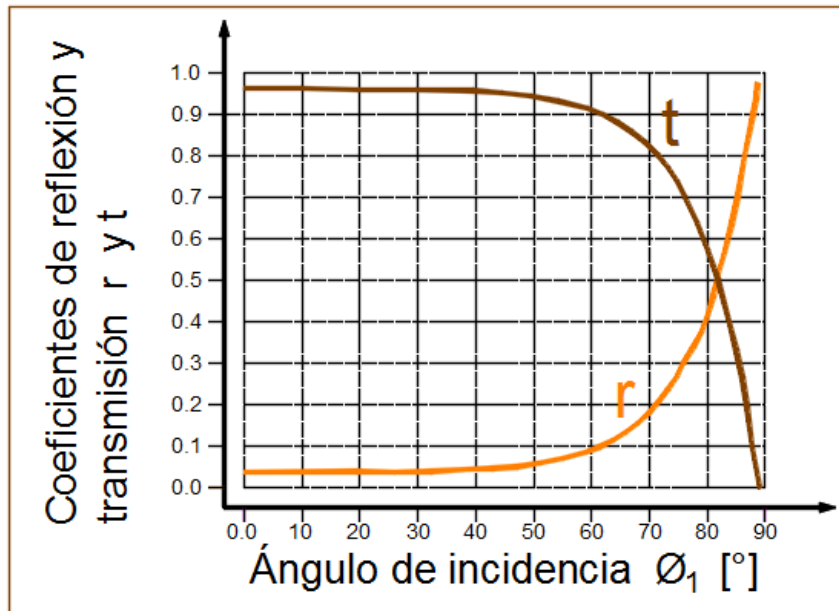


Figura 10. Variación del coeficiente de reflexión
Fuente: (Abal 2013, pp. 4)

A partir de la figura 10 se observa que en las placas transparentes empleadas como cubierta, para ángulos de incidencia θ_1 de hasta 60° , el valor del coeficiente de reflexión r es menor al 10%, para valores mayores del ángulo r crece rápidamente. El coeficiente de transferencia prácticamente se mantiene constante para ángulos de incidencia de hasta 60° , para ángulos mayores decrece ostensiblemente.

Existe un ángulo de incidencia para el cual el rayo reflejado es perpendicular con la dirección del rayo refractado, a éste se conoce como ángulo de Brewster, si el rayo incidente ingresa a la interfaz con el ángulo de Brewster, se produce la máxima polarización de rayo transmitido; debido a que el sol, la fuente de energía luminosa está en movimiento, el paso por este ángulo será de muy corto tiempo, por lo que no es aplicable al análisis de los paneles solares.

1.3.4 Mecanismo para conversión y transmisión de energía

La radiación solar tanto directa como difusa, es la energía a absorber. Su magnitud es función de las características geográficas (latitud, altura sobre el nivel del mar, sombras, cobertura nubosa), climatológicas, ángulo de instalación y época del año del lugar de implementación. A los efectos del diseño de un colector solar plano, solo es necesario tomar un valor de referencia, estimado para la zona en estudio. (Fauroux, 2012, pp. 3).

En el funcionamiento del colector de placas planas, la energía transmitida a través de la cubierta protectora, llega a la placa absorvedora, para calentarla como consecuencia de la transformación de la energía electromagnética en térmica. La placa absorvedora solo capta una parte de ella e incrementa su temperatura. La porción no absorbida es emitida como radiación térmica en el espectro infrarrojo (emisión de onda larga) y luego reflejada a la cubierta. La cubierta en estas condiciones de temperatura bloquea la radiación infrarroja, por lo que es nuevamente reflejada a la placa absorvedora. En esta situación “el vidrio de la placa de cubierta se calienta y empieza a emitir radiación, donde aproximadamente la mitad se difunde hacia el exterior perdiéndose pero la otra mitad vuelve al interior y contribuye a calentar aún más la placa absorvedora”. (Fauroux, 2012, pp. 4).

La figura 11 muestra la descomposición de un rayo de luz transmitido por la placa de cubierta hacia la placa absorvedora, inicialmente llega a ésta, la calienta, pero existe una parte que es reflejada por radiación de la placa absorvedora hacia la placa de cubierta, ésta vuelve a reflejar el rayo hacia la placa absorvedora y el proceso descrito vuelve a repetirse, a este proceso se conoce como el efecto invernadero dentro del colector solar de placas planas.

El efecto invernadero dentro del colector es acumulativo, pero tiene un límite, que es cuando las pérdidas de calor aumentan hasta que la energía recibida es igual a la desperdiciada. La temperatura máxima alcanzada es conocida como temperatura de estancamiento” (Fauroux, 2012, pp. 5).

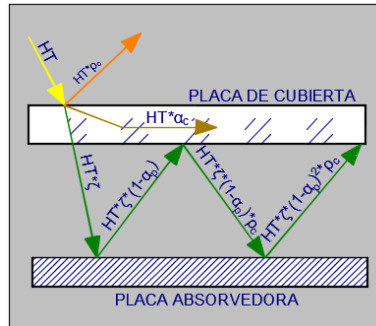


Figura 11.Efecto invernadero dentro del colector

Fuente: (Fauroux, 2012)

Para un colector solar de agua sanitaria que en términos generales es igual al colector solar de aire, las pérdidas tienen varios sumideros como se indican en la figura

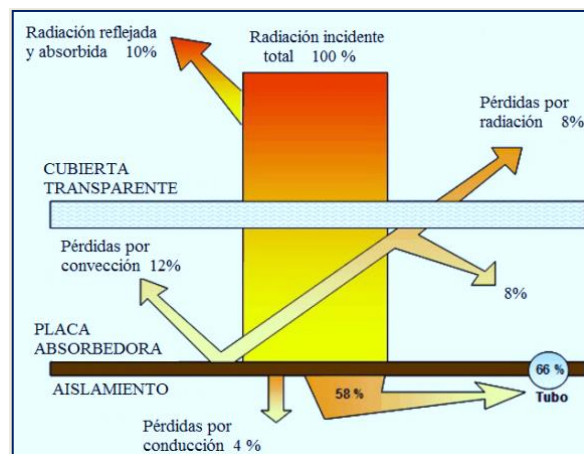


Figura 12.Pérdidas térmicas en un colector solar
Fuente: (Cerón 2015)

La figura 12 esquematiza la incidencia de la radiación solar total y el aprovechamiento efectivo transmitido a la placa absorbidora del colector solar de placas planas. Los valores indicados son meramente orientativos, ya que los valores reales dependen de diversos factores como transmitancia del vidrio, tipo de placa absorbente, etc.

En cuanto al mecanismo de transferencia de energía térmica, en un colector solar se desarrollan los tres procesos generales de transmisión: conducción, convección, y radiación.

La conducción se establece en medios sólidos en presencia de un gradiente de temperatura, el flujo calorífico siempre va del punto de mayor al punto de menor temperatura. La convección es característica de medios en fase líquida, el calor se transmite a través del movimiento convectivo de las partículas, finalmente la radiación es el transporte de energía calorífica mediante movimiento ondulatorio, puede tener lugar tanto en presencia de materia como en ausencia de ella. Cabe mencionar que la transmisión de energía térmica no puede hacerse a considerables distancias, por lo que la utilización de la energía almacenada, deberá hacerse en el sitio.

1.3.5 Resistencias que se oponen al proceso térmico:

La energía que atraviesa la cubierta plana transparente, se transmuta en calor incrementando la temperatura de la placa colectora, a partir de ésta, se puede llevar el calor a tubos que contienen agua, aceite térmico o cualquier otro fluido de trabajo, en otros casos calentar el aire circundante a la placa para los calefactores indirectos, muchos tratadistas a los puntos de sumideros donde se pierde la energía en forma análoga con los circuitos eléctricos los denominan resistencias, una semblanza de las resistencias térmicas que enfrenta el proceso se muestra en la siguiente figura:

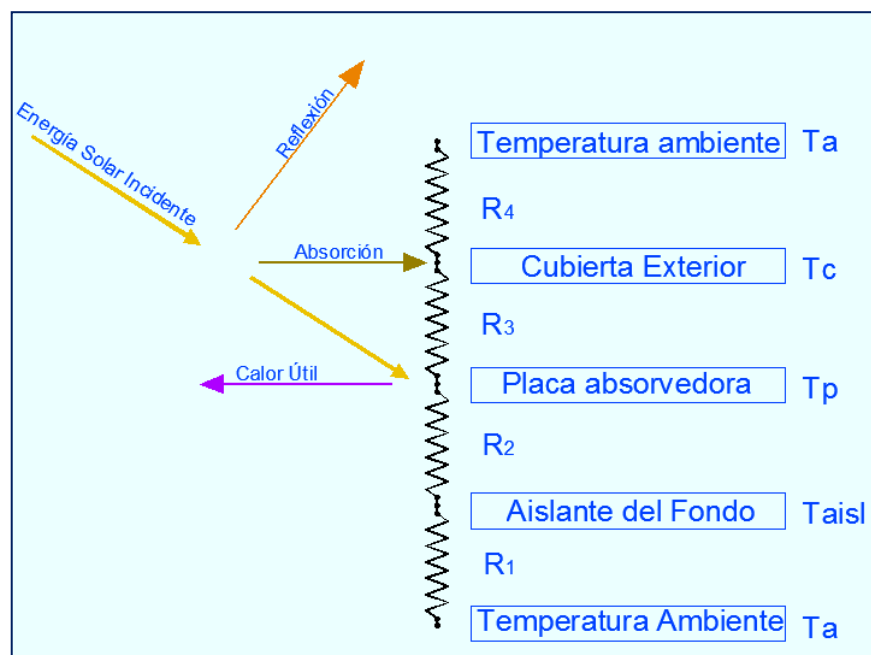


Figura 13. Resistencias térmicas en un colector solar

Fuente: (Fauroux, 2012)

1.3.6 Colector solar de placas planas:

El modelo de colector solar que se propone para las pruebas, es un prototipo experimental de colector solar de aire de lazo abierto, éste, tiene inicialmente una placa protectora continua de vidrio translúcido, sobre la que posteriormente se podrán montar las placas protectoras discontinuas, en la figura siguiente se muestran las partes principales del colector.

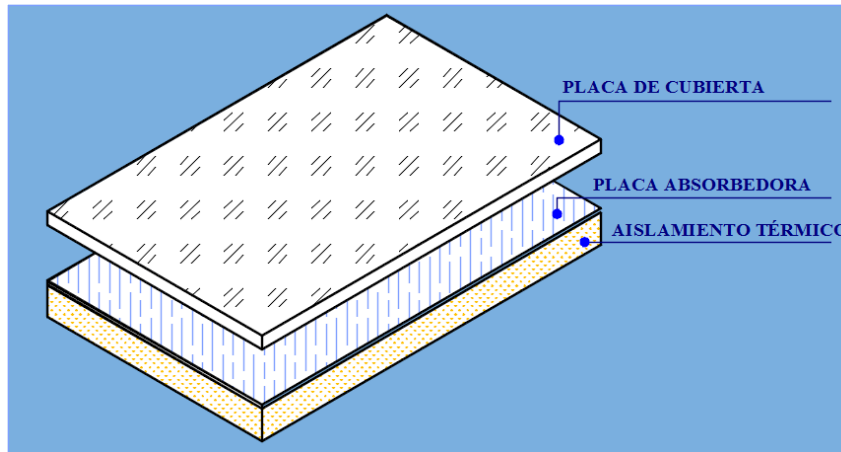


Figura 14. Estructura básica de un colector solar de aire
Fuente: Elaboración propia

Tema especial constituyen las dimensiones generales del colector, en una revisión de literatura, se consultó las normas NTE INEN 2 507: 2009, NEC – 10 parte 14 -1, GPE INEN 18 y la ISO / FDIS 9806 – 2013 en todas, las dimensiones se refieren a la proporcionalidad que debe existir entre las dimensiones del panel y las cantidades de energía que se requieran. Para calentamiento de agua, existe una sugerencia, el área de los colectores solares de placa plana A_c , se expresa de la forma siguiente: (Faurox, 2012).

$$1.50 m^2 \leq A_c \leq 2.6 m^2 \quad [11]$$

En el Ecuador aún no existe el modelo de calentador solar estándar que permita establecer las homologaciones con otros modelos construidos, revisando ofertas de casas fabricantes nacionales e internacionales, se tiene que todas respetan la sugerencia expuesta. Para el calentador solar de aire, existen algunos prototipos de medidas especiales, pero que no obedecen a ninguna reglamentación.

1.3.7 Configuración del prototipo

En el proyecto, el colector solar base o prototipo, es uno de placa translúcida de cubierta plana, construido en perfiles y lámina de acero galvanizado, su propósito inicial es determinar la eficiencia térmica básica de la radiación solar en Latacunga. Adicionalmente existen unas estructuras fijas a la carcasa del colector que permiten colocar las placas planas discontinuas sobre la placa plana de cubierta, para el proceso de determinación práctica del mejoramiento o no de la eficiencia, estas placas discontinuas estarán conformadas por diferentes elementos translucidos, se considera al vidrio claro flotado, como materia prima inicial a utilizarse; la configuración geométrica de los elementos translúcidos produce una reflexión adicional a los rayos solares incidentes volviéndolos a la placa de cubierta a fin de que no se pierdan en el ambiente, además proporcionan una superficie discontinua en la cubierta, lo cual disminuye las pérdidas convectivas con la corriente de viento; al aumentar la masa de la cubierta protectora será más difícil que se enfríe rápidamente.

Las dimensiones del prototipo se pueden seleccionar aleatoriamente, largo y ancho generan el área de absorción del colector, y ésta es proporcional a la cantidad de energía absorbida, para el presente estudio se propone 1 m de largo por 0.5 m de ancho, o sea de 0.5 m² de área de recolección. Las pruebas del colector se realizarán en el prototipo propuesto, de acuerdo a los procedimientos establecidos en las normas INEN y a falta de ellas, las normas internacionales más utilizadas que son las ISO 9806 y las ANSI/ASHRAE.

El rendimiento de los colectores solares, se determina obteniendo valores instantáneos de la eficiencia η , para diferentes combinaciones de radiación incidente, temperatura ambiente y temperatura de salida del fluido. Todo esto requiere de mediciones experimentales de la cantidad de radiación solar incidente, así como también de la cantidad de energía que posee el fluido que pasa a través del colector, todo ello bajo condiciones de estado estacionario o cuasi estado-estacionario. (Rodríguez, 2012).

1.3.8 Modelo matemático

La obtención de calor a partir de la radiación solar en colectores de placa plana, ha sido ampliamente analizada por diferentes autores en diversas épocas, en una revisión de literatura especializada del tema, se pueden observar los más disímiles propósitos como: satisfacer necesidades industriales, probar nuevos materiales de construcción, disminuir pérdidas térmicas, optimización de diseños, reducción de costos o maximizar rendimientos. En general todos los modelos matemáticos tienen estructura similar pero el que mejor se ajusta al propósito de este estudio es un trabajo de Lema, A., Pontin, M., Morsetto, J., y Ruestch L “Diseño, Desarrollo y Análisis de un Colector Solar de Aire con Placa Plana, Eficiencia y Exergía Perdida”, publicado el año 2014 en la Universidad de Córdoba, Argentina. El modelo seleccionado analiza el colector solar de aire con placa plana simple, no tiene ninguna información de colectores de placa de cubierta discontinua. El efecto de los diseños alternativos placa de cubierta, constituyen tema específico del presente proyecto.

De acuerdo a un razonamiento termodinámico, rendimiento es el cociente entre la energía que se obtiene para la energía que se invierte, esto puede ser matemáticamente expresado por la fórmula de (Duffie and Beckman, 1992).

$$\eta = \frac{Q_u}{H_t * A_c} \quad [12]$$

donde:

- $\eta \equiv$ Rendimiento energético
- $Q_u \equiv$ Calor útil ganado por el fluido de trabajo [W]
- $H_t \equiv$ Energía solar total incidente sobre el plano [W/m²]
- $A_c \equiv$ Área efectiva del colector [m²]

El calor útil depende del caudal másico del fluido y se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$Q_u = \dot{m}_{fluido} * C_{p_{fluido}} * (T_s - T_e) \quad [13]$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{aire} &\equiv \text{Caudal másico del aire} && [\text{kg/s}] \\ C_{p\text{aire}} &\equiv \text{Calor específico del aire} && [\text{J/kg } ^\circ\text{C}] \\ T_s &\equiv \text{Temperatura del aire a la salida} && [^\circ\text{C}] \\ T_e &\equiv \text{Temperatura del aire a la entrada} && [^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

El caudal másico del aire se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{m} = A_f * V * \rho \quad [14]$$

Donde:

$$\begin{aligned} A_f &\equiv \text{Área del flujo} \quad [\text{m}^2] \\ V &\equiv \text{Velocidad del aire} \quad [\text{m/s}] \\ \rho &\equiv \text{Densidad del aire en función de la temperatura} \quad [\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

El calor útil absorbido por el aire, en relación a los parámetros del ambiente y los de diseño del colector solar de placa plana en estado estacionario, se expresan mediante la ecuación de Hottel-Whiller

$$Q_u = A_c * F_R [H_t * (\tau * \alpha) - U_L (T_e - T_a)] \quad [15]$$

Donde:

$$\begin{aligned} A_c &\equiv \text{Área de apertura del colector} \quad [\text{m}^2] \\ F_R &\equiv \text{Factor de remoción de calor del colector} \quad [\text{adim.}] \\ (\tau * \alpha) &\equiv \text{Producto de la transmitancia-absorbancia efectiva} \quad [\text{adim.}] \\ U_L &\equiv \text{Coeficiente total de pérdidas de calor en el colector} \quad [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \\ T_a &\equiv \text{Temperatura del ambiente} \quad [^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

La expresión $(\tau * \alpha)$, es una característica del material de cubierta y representa el efecto invernadero en el interior del colector. De acuerdo con (Duffie and Beckman, 1992), al combinar las fórmulas 12 y 15 se obtiene la fórmula de rendimiento, que se expresa de la siguiente forma:

$$\eta = F_R * (\tau * \alpha) - U_L * F_R * \left(\frac{T_e - T_a}{H_t} \right) \quad [16]$$

En la fórmula 16, el primer término del lado derecho se conoce como $\eta_0 \equiv$ rendimiento óptico y el segundo término es el factor de pérdidas de calor.

1.3.9 Análisis de las pérdidas exergéticas

La política energética actual en el estudio de los sistemas térmicos exige que analizar el rendimiento de los sistemas térmicos, en función de la energía solamente, no basta, hace falta analizar la calidad de ésta en el desarrollo de los procesos; la capacidad de la energía para desarrollar trabajo a través de la interacción del sistema con el medio, se conoce como exergía, a ésta se la conceptúa como una función termodinámica de punto, en la que la variación del valor de los parámetros inicial y final, solo depende de la posición de los estados termodinámicos de salida y llegada, más no de la trayectoria para arribar a ellos. “En otras palabras la exergía es la porción de la energía que puede ser transformada en trabajo mecánico” (Lema, 2011, pp. 4).

“La exergía se define como una medida del trabajo potencial de las diferentes formas de energía usando los parámetros ambientales como referencia. A través de un balance de exergía aplicado a un sistema, se evalúa la degradación de la energía en un proceso. Así, la degradación energética equivale a la disminución del potencial de trabajo (exergía) ocasionado por la irreversibilidad de los procesos reales” (Lema, 2011, pp. 7).

El balance exergético para un colector solar simple de aire de placas paralelas que actúa como un sistema termodinámico abierto, operando en estado estacionario tiene que considerar: el valor exergético de la radiación solar en el lugar, la exergía del flujo solar incidente en el colector solar, la exergía asociada con el flujo de salida y las irreversibilidades propias del proceso, todas ellas se presentan en la figura siguiente:

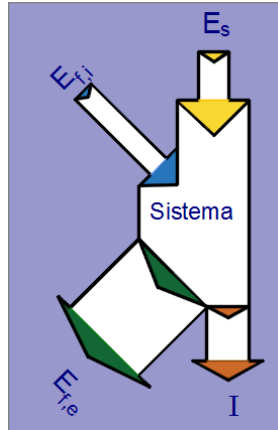


Figura 15. Flujos de exergía en un colector solar de aire
Fuente:(Lema, 2011)

De acuerdo con la figura 15, la ecuación del balance exergético se puede escribir mediante la siguiente fórmula:

$$E_{sol} + E_{f,i} = I + E_{f,s} \quad [17]$$

Donde:

- $E_{sol} \equiv$ Exergía de la radiación solar [W]
- $E_{f,i} \equiv$ Exergía del flujo a la entrada del colector [W]
- $E_{f,s} \equiv$ Exergía del flujo a la salida del colector [W]
- $I \equiv$ Irreversibilidad o exergía perdida [W]

La exergía correspondiente a la radiación solar incidente en un lugar determinado, se puede evaluar de acuerdo a la ecuación propuesta por (Chaturvedi, 1991).

$$E_{sol} = A_c * H_t * (\tau * \alpha) * \left[1 - \frac{4 T_a}{3 T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right] \quad [18]$$

Los parámetros de la fórmula 18, han sido tratados anteriormente, la única salvedad es la temperatura del sol, al que se considera como un cuerpo negro y su temperatura $T_{sol} = 5800^\circ\text{K}$

La energía total del flujo de la corriente aire es la suma de la entropía, la entalpía, la energía cinética y la potencial, por tanto la exergía del flujo mencionado será la suma de las exergías de los elementos mencionados, se puede expresar su valor específico como:

$$E_f = (h - h_a) - T_a(S - S_a) + \frac{V^2}{2} + g * z \quad [19]$$

Donde:

- $h \equiv$ Entalpía del flujo [kJ/kg]
- $h_a \equiv$ Entalpía del ambiente [kJ / kg]
- $S \equiv$ Entropía del flujo
- $S_a \equiv$ Entropía del ambiente
- $V \equiv$ Velocidad de flujo del sistema
- $g \equiv$ Gravedad
- $z \equiv$ Diferencia de nivel
- $T_a \equiv$ Temperatura del aire ambiente

Si en La ecuación 19 se desprecian los valores de la energía cinética y de la potencial por ser poco significativos en la mayoría de los procesos termodinámicos de ingeniería y se destruyen los paréntesis se tiene:

$$E_f = h - T_a * S - h_a + T_a * S_a = h - T_a * S - (h_a - T_a * S_a) \quad [20]$$

Tomando en cuenta que E_f , la energía del flujo, se puede expresar como la diferencias de los flujos de entrada y salida, además de que el sistema por ser abierto a la salida sus parámetros coinciden con los del ambiente, la fórmula 20 se puede expresar de la siguiente forma:

$$E_f = E_{f,e} - E_{f,s} = (h_e - T_a * S_e) * \dot{m}_e - (h_s - T_a * S_s) * \dot{m}_s \quad [21]$$

Donde:

- $\dot{m}_e \equiv$ Flujo másico de entrada
- $\dot{m}_s \equiv$ Flujo másico de salida

Despejando de la fórmula 17 la irreversibilidad y reemplazando los valores de las exergías dadas por la fórmula 21 se tiene:

$$I = A_c * H_i * (\tau * \alpha) \left[1 - \frac{4 T_a}{3 T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right] + \dot{m}_e (h_e - T_a * S_e) - \dot{m}_s (h_s - T_a * S_s) \quad [22]$$

Haciendo $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$ y destruyendo los paréntesis de los términos segundo y tercero de la fórmula 22 se tiene:

$$\dot{m} * h_e - \dot{m} * T_a * S_e - \dot{m} * h_s + \dot{m} * T_a * S_s = \dot{m} * (h_e - h_s) - \dot{m} * T_a * (S_e - S_s) \quad [23]$$

Cambiando el sentido de los términos salida menos entrada en la ecuación 23, se tiene:

$$= -\dot{m} * (h_s - h_e) + \dot{m} * T_a * (S_s - S_e) \quad [24]$$

Reemplazando la fórmula 24 en la 22 se tiene:

$$I = A_c * H_i * (\tau * \alpha) \left[1 - \frac{4 T_a}{3 T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right] - \dot{m} * (h_s - h_e) + \dot{m} * T_a * (S_s - S_e) \quad [25]$$

Considerando al aire como gas ideal, la diferencia de entalpías se puede expresar como:

$$h_s - h_e = c_p * (T_s - T_e) \quad [26]$$

Donde:

$h_s \equiv$ Entalpía del aire a la salida del colector

$h_e \equiv$ Entalpía del aire a la entrada del colector

$c_p \equiv$ Calor específico del aire a presión constante

$T_s \equiv$ Temperatura del aire a la salida del colector

$T_e \equiv$ Temperatura del aire a la entrada del colector

Considerando al aire como gas ideal, la diferencia de entropías se puede expresar como:

$$S_s - S_e = c_p * \ln \frac{T_s}{T_e} - R * \ln \frac{P_s}{P_e} \quad [27]$$

Donde:

$S_s \equiv$ Entropía del aire a la salida del colector

$S_e \equiv$ Entropía del aire a la entrada del colector

$R \equiv$ Constante universal de los gases

$P_s \equiv$ Presión del aire a la salida del colector

$P_e \equiv$ Presión del aire a la entrada del colector

Reemplazando las fórmulas 26 y 27 en la 25 se tiene:

$$I = A_c * H_t * (\tau * \alpha) \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right] - \dot{m} * c_p * (T_s - T_e) + \dot{m} * c_p * T_a * \ln \frac{T_s}{T_e} - \dot{m} * c_p * T_a * \ln \frac{P_s}{P_e} \quad [28]$$

A partir de la definición de la eficiencia desde el punto de vista de la exergía η_{II} , es posible obtener la eficiencia por la Segunda Ley de la Termodinámica, para diferentes procesos térmicos que funcionan como sistemas abiertos en estado estacionario, cuando los cambios de energía cinética y energía potencial son despreciables. La eficiencia para un colector solar de aire de placa plana por la Segunda ley de la Termodinámica, puede ser calculada como:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\text{exergía perdida}}{\text{exergía suministrada}} \quad [29]$$

Reemplazando las fórmulas 18 y 28 en la 29 se tiene:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{I}{A_c * H_t * (\tau * \alpha) * \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right]} \quad [30]$$

1.3.10 Flujo de aire en colector solar de placa plana

La placa absorbidora se calienta por efecto de la incidencia de la radiación solar, para aprovechar esa cantidad de energía térmica almacenada es necesario la presencia de un flujo que la movilice, en el presente caso, se lo hará mediante una corriente de aire impulsada por un ventilador. El mecanismo de transmisión de calor entre la placa y el flujo de aire se da por conducción en la superficie de la placa y por convección para otras distancias más lejanas.

La transferencia de calor por convección depende con intensidad de las propiedades del fluido: Viscosidad dinámica (μ), Conductividad térmica (k), densidad (ρ), Calor específico a presión constante (C_p), así como de la velocidad flujo (V). También depende de la configuración geométrica y asperezas de la superficie sólida y del tipo de flujo del fluido (laminar o turbulento). Por tanto no es sorprendente que la convección sea el mecanismo más complejo de transferencia de calor al relacionar tantas variables. (Revilla 2012).

La mayor parte de las variables mencionadas en la cita anterior, para flujos reales se relacionan con los números de Nusselt, Reynolds y Prandtl, que a continuación se definen:

Número de Nusselt: es un número adimensional que compara la transferencia de calor por convección frente a la transferencia por conducción, se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$N_u = \frac{h * D_h}{k} \quad [31]$$

Donde:

$h \equiv$ Coeficiente convectivo de transferencia de calor [$W/m^2 * ^\circ C$]

$k \equiv$ Coeficiente de conductividad térmica [$W/m * ^\circ C$]

$D_h \equiv$ Diámetro hidráulico [m]

Número de Reynolds: Es un número adimensional que resulta de la comparación entre las fuerzas de inercia para las fuerzas debidas a la viscosidad, relaciona conceptos como: velocidad media, densidad, viscosidad cinemática y viscosidad dinámica o absoluta. Se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{V * \rho * Dh}{\mu} = \frac{V * Dh}{\nu} \quad [32]$$

Donde:

$V \equiv$ Velocidad media del flujo [m/s]

$\rho \equiv$ Densidad del fluido [kg/m^3]

$\nu \equiv$ Viscosidad cinemática [m^2/s]

$\mu \equiv$ Viscosidad absoluta [$kg*s/m^2$]

Número de Prandtl: Es un número adimensional igual al coeficiente entre la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento para la velocidad de difusión del calor, se emplea para describir el espesor relativo de las capas límites de velocidad y térmicas como se indica en la fórmula siguiente:

$$P_r = \frac{C_p * \mu}{k} \quad [33]$$

Donde:

Pr \equiv Número de Prandlt

Diámetro hidráulico: Es un concepto utilizado en mecánica de fluidos para ductos de sección transversal no circular, se calcula por la siguiente expresión:

$$D_h = \frac{4 * A_t}{P_m} \quad [34]$$

Donde:

Dh \equiv Diámetro hidráulico [m]

A_t \equiv área de la sección transversal [m²]

P_m \equiv perímetro mojado [m]

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1 Diagnóstico inicial

El Ecuador debe su nombre a la línea ecuatorial o línea de latitud cero que lo atraviesa, con referencia a la longitud, se encuentra en el quinto huso horario. Las condiciones geográficas hacen de esta nación una zona privilegiada para el aprovechamiento de la energía solar, según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI: “En este país existe a lo largo del año un promedio de 12 horas de sol, variando entre alrededor de 11.45 a 12.20 horas dependiendo de la posición de la tierra en la órbita elíptica alrededor del sol” (INAMHI, 2012)

La radiación solar tiene dos modalidades: directa y difusa, los montos de ellas dependen de la configuración geográfica, presencia de nubes y cargas de viento. Las cantidades de energía disponible para el proyecto son muy elevadas. A partir de estudios realizados por el Consejo Nacional de Electrificación (CONECEL), la radiación solar directa tiene una intensidad máxima promedio de 5 119 Wh/m² y una mínima, también promedio de 1 147 Wh/m², tomando en cuenta solamente el segundo dato, se puede advertir que la cantidad de energía presente disponible, es suficiente para garantizar el funcionamiento de cualquier proyecto en energía solar.

A finales del Siglo XX, el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los Estados Unidos, desarrolla un modelo que permite conocer la insolación total diaria sobre una superficie horizontal, el modelo se conoce como CRSM (Climatological Solar Radiation Model) y se utiliza para la elaboración del Atlas Solar del Ecuador, que con fines de generación eléctrica, se publicó el año 2008.

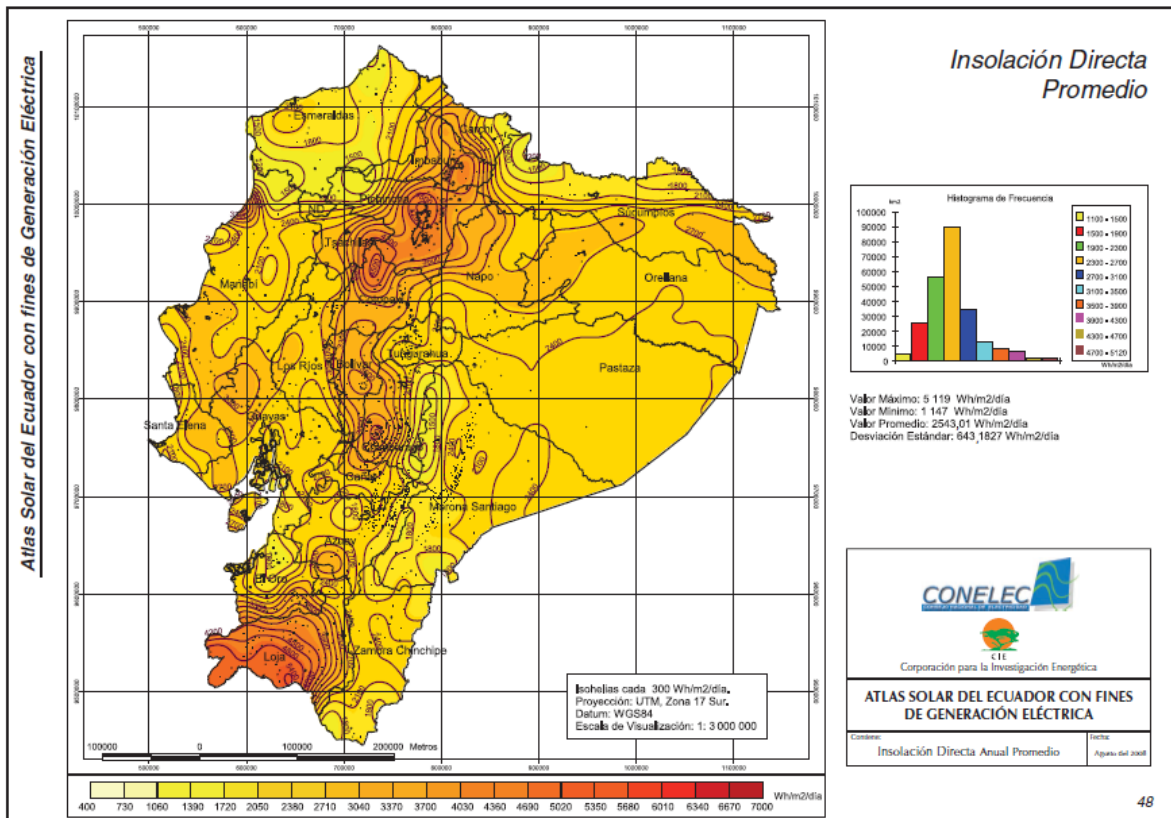


Figura 16. Atlas solar del Ecuador
Fuente: (CONELEC, 2008)

Revisando mes a mes la insolación en el Ecuador en el Atlas Solar se puede advertir que la configuración se mantiene, por ello se puede afirmar que básicamente existen tres zonas de insolación máxima: la Región Sierra Centro Norte, la Región Sierra Sur y la Región Insular, desde épocas anteriores se tenía conocimiento que los puntos de máxima insolación estaban localizados, en la Estación Experimental Pichilingue en la provincia de Pichincha, cantón Cariamanga en la Provincia de Loja y ciudad de Santa Cruz en el Archipiélago de Galápagos.

2.2 Diseño de la investigación

El proceso de investigación se relaciona con la experimentación de un colector solar de aire placa plana en la ciudad de Latacunga, inicialmente se identifica el escenario ambiental, en el cual se desarrollarán las pruebas de este modelo.

2.2.1 Condiciones geo-ambientales de la ciudad de Latacunga

La capital de la provincia de Cotopaxi, Latacunga, según la página dateandtime.info.es, tiene las siguientes coordenadas:

- Latitud: 0°56'06''S
- Longitud: 78°36'55''O
- Altura sobre el nivel del mar: 2769 msnm

La temperatura tiene variaciones que no se podrían calificar de extremas, como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 1. Variación de temperatura en Latacunga en el año 2016

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima registrada (°C)	26	26	26	26	27	27	27	27	26	26	27	26	26,4
Temperatura diaria máxima (°C)	18	18	18	16	16	18	19	19	19	19	19	18	18,1
Temperatura diaria mínima (°C)	10	10	11	10	8	8	2	2	2	3	5	8	6,6
Temperatura mínima registrada (°C)	--	--	0	--	0	-3	-4	-2	-3	-2	--	2	--

Fuente: <http://www.vivelatacunga.com/info-basica/>

Debido a que los datos de un solo año, si bien establecen una tendencia es más confiable para el proyecto la tendencia de varios años, por ello, se presenta un histórico de una década desde el año 2006 hasta el año 2015, en el que se incluye también la velocidad del viento.

Tabla 2. Histórico climático para la ciudad de Latacunga

Año	T [°C]	TM [°C]	Tm [°C]	V [km / h]
2006	13.90	19.20	8.60	12.50
2007	13.70	19.30	8.60	12.30
2008	13.50	18.70	8.40	11.00
2009	14.10	20.10	8.90	14.40
2010	14.00	20.20	8.40	14.40
2011	14.30	19.90	8.40	14.40
2012	14.10	20.70	8.60	15.50
2013	13.10	20.70	8.60	15.50
2014	13.00	20.10	8.60	14.60
2015	13.20	20.80	8.70	14.60

T ≡ temperatura media, TM ≡ temperatura media alta,

Tm ≡ temperatura media baja, V ≡ velocidad del viento

Fuente: <http://www.tutiempo.net/clima/Latacunga/841230.htm>

Mediante una fuente digital se puede obtener la proyección de las temperaturas máximas y mínimas para los siguientes 14 días en la ciudad de Latacunga, como indica la siguiente figura:

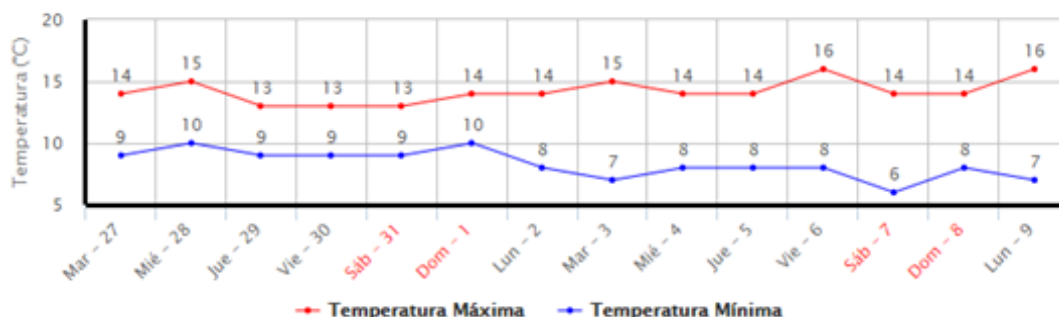


Figura 17. Temperaturas máximas y mínimas medias para los próximos 14 días

Fuente: <http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Mediante una fuente digital se puede obtener la proyección de los valores máximos y mínimos de la presión atmosférica para los siguientes 14 días en la ciudad de Latacunga, como indica la siguiente figura:

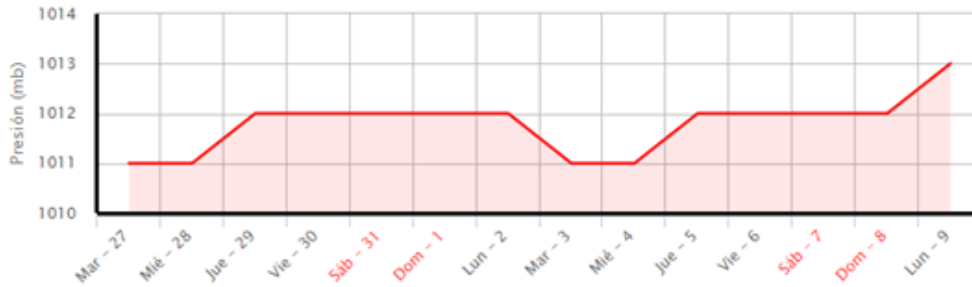


Figura 18. Presión atmosférica para los próximos 14 días

Fuente: <http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Mediante una fuente digital se puede obtener la proyección de los valores máximos y mínimos de la velocidad del viento para los siguientes 14 días en la ciudad de Latacunga, como indica la siguiente figura:

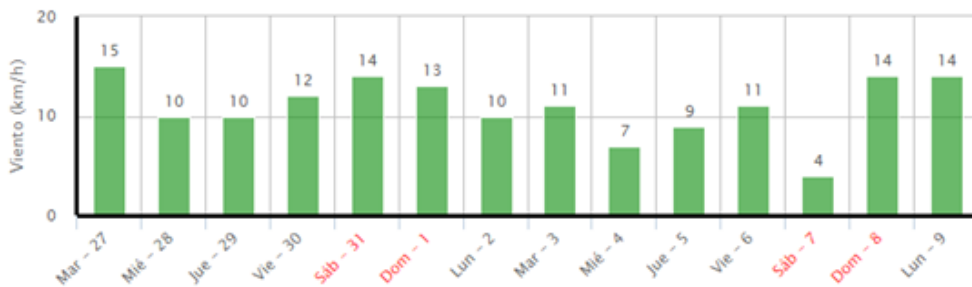


Figura 19. Velocidad del viento para los próximos 14 días

Fuente: <http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Mediante una fuente digital se puede obtener la proyección de los valores máximos y mínimos de la humedad relativa para los siguientes 14 días en la ciudad de Latacunga, como indica la siguiente figura:

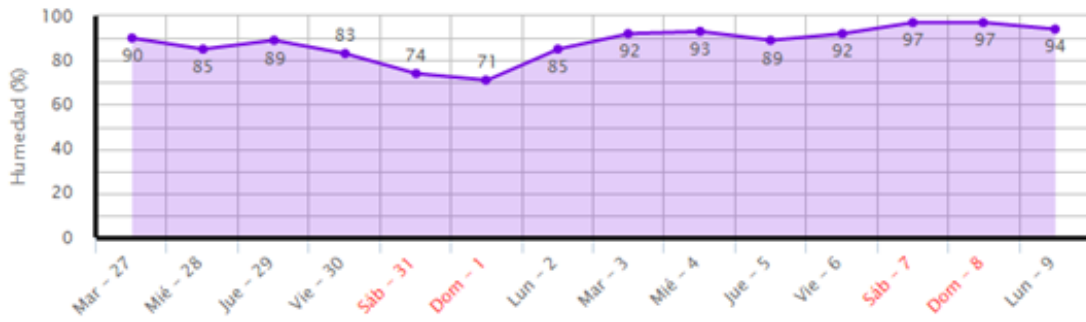


Figura 20. Humedad relativa (%) para los próximos 14 días

Fuente: <http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

El valor teórico de la radiación solar en Latacunga, se toma de la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC 10, parte 14-1 Energía renovable, la cual clasifica al país en cinco regiones de acuerdo a la radiación solar que reciben, Cotopaxi pertenece a la zona IV, como indica en la tabla siguiente:

Tabla 3. Zonas de irradiación solar
en el Ecuador

Zonas	[Wh /m ² .día]
Zona I	3200 - 3600
Zona II	3600 - 4000
Zona III	4000 - 4400
Zona IV	4400 - 4800
Zona V	4800 - 5200

Fuente: Norma NEC 10

La irradiación solar promedio por provincia se presenta en la siguiente tabla comparativa donde se puede observar que en la provincia de Cotopaxi, el cantón Latacunga, es una de las zonas que mayor cantidad de irradiación solar recibe.

Tabla 4. Valores promedio de irradiación solar en las provincias del Ecuador

PROVINCIA	CIUDAD	Wh / m ² .día Promedio	ZONA
Carchi	Tulcán	4140	III
Esmeraldas	Esmeraldas	4350	III
Imbabura	Ibarra	4560	IV
Manabí	Portoviejo	4160	IV
Pichincha	Quito	4990	V
Tsachila	Sto. Domingo	3440	I
Cotopaxi	Latacunga	4420	IV
Napo	Tena	4350	III
Santa Elena	Salinas	4360	III
Guayas	Guayaquil	4370	III
Los Ríos	Babahoyo	3780	II
Bolívar	Guaranda	4800	IV
Tungurahua	Ambato	4550	IV
Chimborazo	Riobamba	4490	IV
Pastaza	Puyo	3800	II
Cañar	Azogues	4500	IV
Morona Santiago	Macas	4090	III
Azuay	Cuenca	4350	III
El Oro	Machala	4200	III
Loja	Loja	4350	III
Zamora Chinchipe	Zamora	4350	III
Galápagos	Puerto Ayora	5835	V

Fuente: Norma NEC 10

A partir de los datos de las tablas 1 – 4 y las figuras 18 – 21, se puede afirmar que Latacunga es un buen lugar para proyectos de energía solar, las variaciones de cantidades térmicas, humedad relativa, presión atmosférica no son demasiado pronunciadas lo que implica que se puede tener confianza en los cálculos y diseño.

2.2.2 Modalidad de la investigación

La modalidad de investigación en el proyecto corresponde a una investigación explicativa, que se encargará de buscar cómo mejorar el rendimiento energético en los colectores solares de aire placa plana, estableciendo relaciones causa-efecto, entre la aplicación de cubiertas discontinuas y el nivel de rendimiento energético.

2.2.3 Tipos de investigación.

Según el diseño, la investigación será experimental, un proceso en el que se somete a un colector solar de placas planas a determinadas condiciones de las variantes de diseño de la placa de cubierta (variable independiente) para observar los efectos que se producen en el nivel de eficiencia (variable dependiente)

2.3 Métodos de investigación

Existen en la investigación científica dos clases de métodos: lógicos y empíricos, en este proyecto se escogen los segundos, porque permiten abordar el conocimiento del objeto mediante el entendimiento directo y la práctica de la experiencia, los modelos más significativos de los métodos empíricos son observación, medición y experimentación.

2.3.1 Método de Observación

La observación científica consiste en la apreciación verdadera del objeto de investigación, en este caso, el escudriñamiento del colector solar de aire placas planas, permite preparar el diagnóstico, durante el desarrollo de la investigación habilita la comprobación de la hipótesis y al final puede mostrar las tendencias generales del fenómeno investigado.

2.3.2 Método de medición

El objeto de la medición es cuantificar mediante instrumentos los valores de las variables para un momento determinado en el funcionamiento del prototipo y reemplazarlas en las fórmulas del modelo matemático.

2.4 Experimentación científica

El experimento científico se conceptúa como un procedimiento directamente conducente a responder a una o más preguntas planteadas. “El experimentador escoge ciertos factores para su estudio, altera esos factores deliberadamente de forma controlada y después observa el efecto resultante”. (Natrella 2012, pp.234).

Los experimentos son de dos tipos: simples o elementales y completos, los experimentos elementales se caracterizan por analizar solamente una variable entrada y salida del modelo en estudio.

Un experimento completo, consta habitualmente de una serie o combinación de experimentos elementales y los resultados toman la forma de un valor medio o un conjunto de valores medios. El propósito del experimento completo es el de probar la hipótesis correspondiente a los valores medios del universo y posiblemente estimar las medias y los distintos componentes de la varianza. Frecuentemente un diseño experimental logrará una eficacia mayor que la de otros diseños al comprobar la hipótesis y realizar estimaciones. (Duncan. 2012, 124)

La Teoría de Errores a cada experimento asocia un error experimental, que se produce por: disimilitud del material empleado o la variabilidad relacionada con la técnica de experimentación. Para analizar los errores es necesario categorizar algunos elementos que a continuación se definen de acuerdo con el Manual de Control de Calidad (Juran, 2012, pp. 256).

Factor \equiv es uno de los aspectos sometidos a estudio en un experimento, puede ser cuantitativo, temperatura en grados, velocidad en m/s o cualitativo: máquina operarios, en el presente estudio rendimiento en %

Nivel \equiv los niveles de un factor son los valores del factor que se está examinando. En los factores cuantitativos cada valor escogido es un nivel; ejemplo si se trabaja a cuatro temperaturas distintas se dice que el factor temperatura tiene cuatro niveles.

Tratamiento \equiv Es un nivel único asignado a un solo factor durante una prueba. Una combinación de tratamientos es un conjunto de niveles para todos los factores en una prueba experimental dada.

Bloque \equiv porción de material o del ambiente experimental, con más probabilidades de homogeneidad que otras porciones.

Plan de experimentación \equiv Se trata del plan formal para realizar el experimento. Incluye la elección de factores niveles y tratamientos y la utilización de ciertas herramientas denominadas agrupamiento planificado, aleatorización y repetición.

Aleatorización \equiv En la planificación de experimentos, asignar especímenes (a los tratamientos) por puro azar, se denomina aleatorización. Este método de asignación incrementa las probabilidades de que se compense el efecto de las variables no controladas. También aumenta la validez de estimaciones de los errores experimentales y hace posible la realización de ensayos estadísticos de significancia y la construcción de intervalos de confianza.

Repetición \equiv Es la reiteración de una observación o medida. Se efectúa para aumentar la precisión y conseguir los medios para medir ésta. En algunos experimentos no existe ninguna fuente exterior para medir la precisión, de modo que la medida debe obtenerse del experimento mismo.

La repetición brinda una oportunidad para que los efectos de los factores incontrolados se compensen y de este modo, ayuda a la aleatorización actuando como una herramienta de disminución de la tendencia. También ayuda en la detección de errores de bulto en las mediciones. Generalmente se recomienda que el número de repeticiones sean iguales al número de tratamientos.

2.4.1 Plan de experimentación factorial

Según Natrella (2012) la utilización del plan factorial es apropiada cuando han de ser investigados varios factores (rendimientos) a dos o más niveles (tratamientos) y la interacción de los factores es de importancia, la información busca estimar los posibles efectos de la interacción

Aplicados al presente proyecto se tienen:

Factor \equiv Es el rendimiento η_{II} , desde el punto de vista de exergía, dado por la fórmula 30

$$\eta_{II} = 1 - \frac{I}{A_c * H_i * (\tau * \alpha) * \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right]}$$

I se calcula por la fórmula

$$I = A_c * H_i * (\tau * \alpha) \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right] - \dot{m} * c_p * (T_s - T_e) - \dot{m} * T_a * (S_e - S_s)$$

Nivel \equiv el valor en % del rendimiento para distintas cubiertas y flujo másico de aire

Tratamiento \equiv viene asignado por el tipo de cubierta utilizado de acuerdo a la siguiente configuración:

PC₁ \equiv placa de cubierta lisa

PC₂ \equiv Placa de cubierta de triángulos

PC₃ \equiv Placa de cubierta de cuadrados

PC₄ \equiv Placa de cubierta de hexágonos

Bloque \equiv flujo másico de aire, el ventilador tiene 7 niveles de flujo, con el termo - anemómetro se puede determinar la temperatura y el valor del flujo.

Con la temperatura se puede obtener mediante tablas termodinámicas el valor del volumen específico del aire para esa temperatura, con este dato y el flujo volumétrico se puede calcular el flujo másico de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\dot{m} = \frac{Q}{v}$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico [kg/s]

v = volumen específico [m³/kg]

Los tratamientos están caracterizados por el tipo de cubierta empleado, así PC1 es la cubierta continua, PC2 la cubierta cuadrada, PC3 la cubierta triangular y PC4 la cubierta hexagonal, los bloques representan los distintos niveles de flujo másico que puede proporcionar el ventilador.

Tabla 5. Plan de bloques

Bloques	Tratamientos			
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
m_1	η_{11}	η_{12}	η_{13}	η_{14}
m_2	η_{21}	η_{22}	η_{23}	η_{24}
m_3	η_{31}	η_{32}	η_{33}	η_{34}
m_4	η_{41}	η_{42}	η_{43}	η_{44}
m_5	η_{51}	η_{52}	η_{53}	η_{54}
m_6	η_{61}	η_{62}	η_{63}	η_{64}
m_7	η_{71}	η_{72}	η_{73}	η_{74}

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 5, η_{ij} corresponde a la eficiencia exérgica de acuerdo con el flujo másico i y el tipo de cubierta j .

2.5 Instrumentos

Para la cuantificación de los parámetros durante las pruebas se emplearán los instrumentos y elementos que a continuación se detallan:

2.5.1 Piranómetro: instrumento que mide la radiación solar en el lugar donde se realiza el experimento



Figura 21. Medidor de radiación solar

Fuente: vainindustrial.com.ec

Características:

Resolución: 0.1 W/m²

Gamma de error: $\pm 5\%$ del valor medido

Error de temperatura: ± 0.38 W/m²/°C

Rango: 1 – 3999 W/m²

Temperatura de funcionamiento: 0°C – 50°C.

2.5.2 Termo anemómetro: instrumento que mide la velocidad del flujo de aire y la temperatura del mismo

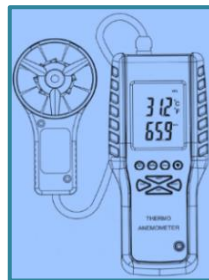


Figura 22. Termo anemómetro

Fuente: www.extech.com.es

Características:

Velocidad del aire: rango (0.4 – 30.0 m/s), resolución (0.01 m/s), precisión $\pm 3\%$

Flujo de aire: rango (0- 9999 m³ / min), resolución 1

Temperatura del aire: rango (-10 – 60 °C), resolución 0.1 °F/C, precisión 2.0°C

2.5.3 Ventilador: Instrumento que se emplea para impulsar el aire caliente que se produce en la cámara del colector solar



Figura 23. Ventilador

Fuente: Black & Decker Ecuador S.A

Características:

Potencia del Motor: 600 W

Consumo en operación: 0.47946 kWh

Velocidad angular máxima: 16000 rpm

Flujo Máximo: 3.5 m³ / h

Niveles de flujo: siete

2.5.4 Termómetro infrarrojo FLUKE 62max +: Instrumento que mide la temperatura mediante rayo láser.



Figura 24. Termómetro infrarrojo

Fuente: www.fluke.com

Características:

Rango de temperaturas: de -30°C a 650°C

Precisión: con temperatura ambiente de 23 °C ±2°C

Resolución óptica: 12: 1 Calculado al 90% de la energía

Repetibilidad: ±0.5% de la lectura

Altitud operativa: 3500 msnm.

2.55 Medidor de temperaturas mediante termocupla: Es un multímetro que mediante termocupla permite medir la temperatura de la placa absorbente



Figura 25. Multímetro digital

Fuente: www.proskit.com

Características:

$(-20 \sim 1000^{\circ}\text{C}) < 400^{\circ} \pm (1.0\% +5d)$

$(-20 \sim 1000^{\circ}\text{C}) \geq 400^{\circ} \pm (1.5\% +15d)$

2.5.6 Aislante Térmico

Film de poliéster aluminizado TBA 10 que se coloca debajo de la placa absorbedora y en los laterales para evitar fugas de calor de la cámara del colector hacia el ambiente, a través de las láminas laterales y fondo.

Características:

Estructura de celda: cerrada

Densidad: 40 kg/m^3 norma ASTM D 1622

Conductividad térmica: $0,035 - 0,045 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ norma ASTM C 518

Absorción de agua: $1,2 \% \text{ V/V}$ norma IRAM 1582

Permeancia al vapor de agua: $0,033 \text{ gr/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$ norma ASTM E-96.

2.5.7 Placa de cubierta

Es una plancha de vidrio translúcido de 1.00 m de longitud, 0.54 m de ancho y 0,005 m de espesor, debido a condiciones de montaje el área de absorción del colector $A_c = 1.00 \text{ m} \cdot 0.5 \text{ m} = 0,5 \text{ m}^2$.

2.5.8 Placa absorbente

Es una plancha de aluminio 6160 T6 de 0.0015 m de espesor que tiene las mismas dimensiones que la placa de cubierta y la misma área de absorción

2.6 Cubiertas discontinuas

En este proyecto de investigación, se emplearán tres tipos de cubiertas discontinuas, con configuraciones geométricas de hexágonos, triángulos y cuadrados, que se ha realizado con láminas de vidrio translúcido de 20 mm de alto y 3 mm de espesor, en la medida de las posibilidades se tiende a que el área interior de las figuras sea similar: Las cubiertas, que se muestran en la figura son independientes del cuerpo del colector solar y pueden superponerse y retirarse con suma facilidad a la placa de cubierta.

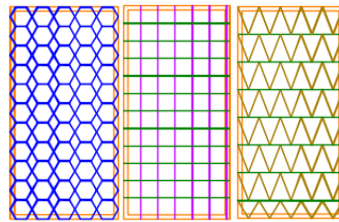


Figura 26. Cubiertas discontinuas

Fuente: elaboración propia

Para el análisis de reflexión solar se asume que ésta es del tipo difusa y que un rayo de luz incide en el interior de la figura, por ejemplo del hexágono, cuando el ángulo cenital, figura 3, es de por lo menos 60° con la normal en el punto medio, si el ángulo cenital es mayor de 60° a ambos lados de la normal, el rayo no incide dentro de la figura, por tanto no hay reflexión en las paredes de la figura.

El ángulo de 30° en la figura 27, se obtiene mediante la relación trigonométrica de los lados del hexágono y la normal en el centro de la base de la misma. La reflexión difusa de un rayo de sol que incide dentro de la figura sobre la placa continua de cubierta va a producir rayos reflejados en las paredes de la figura geométrica (líneas color verde), que vuelven a incidir en la base de la misma. Además la superficie expuesta a la corriente de viento es mucho menor que la de la cubierta continua.

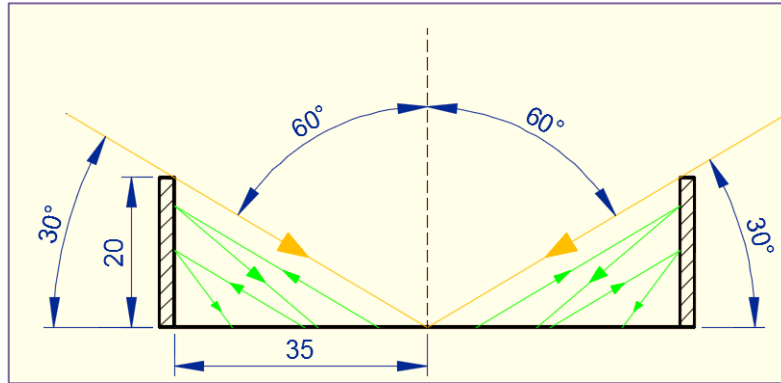


Figura 27. Reflexión en las figuras geométricas de la placa discontinua

Fuente: Elaboración propia

El Sol tiene una trayectoria diaria, cuyo espectro se puede obtener, ya no por la utilización de las ecuaciones, sino mediante páginas electrónicas que realizan en trazo, para cualquier lugar el planeta. En la figura 29 se puede encontrar que para que el ángulo cenital del Sol sea de por lo menos 60° , en la ciudad de Latacunga, el lapso de tiempo está entre 10:30 – 15:30 H. Por tanto las pruebas se realizan en ese periodo, al que también corresponde la mayor radiación solar del día.

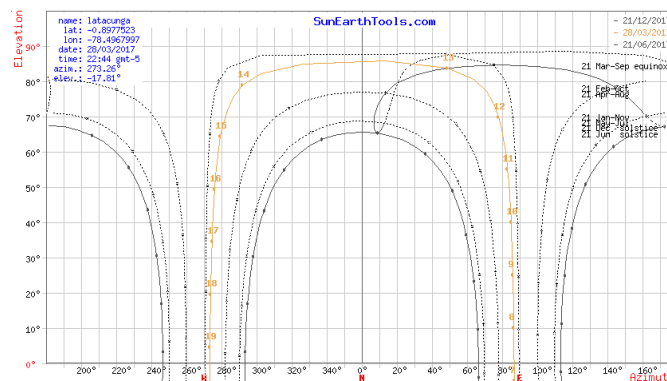


Figura 28. Trayectoria diaria del sol en Latacunga

Fuente: www.sunearthtools.com.

CAPITULO III

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Calentamiento de la placa absorbadora

La hipótesis del presente trabajo de investigación establece que la utilización de las cubiertas discontinuas, mejorará el desempeño del colector solar de placas planas y por ende su eficiencia, tomando en cuenta que la placa absorbadora es el elemento principal de acumulación de energía en el funcionamiento del colector; una de las formas iniciales de comprobar la hipótesis, es observar el calentamiento de ésta, midiendo su temperatura, para lo cual se ha instalado una termocupla tipo J en ella.

El procedimiento consiste en determinar el nivel de radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura ambiente al momento de poner en funcionamiento al colector solar, luego, de acuerdo a las normas ANSI/ASRHA 93 se espera 30 minutos para que se calienten las placas del colector y medir la temperatura de la placa absorbadora mediante el multímetro, este valor de temperatura es el valor de comparación. Luego se coloca la placa discontinua, de la misma forma anterior se espera 30 minutos para que se caliente la cubierta y se mide la temperatura de la placa absorbadora, el procedimiento se repite para diversos niveles de radiación y se puede establecer la configuración geométrica que mayor calentamiento produce en la placa absorbadora. Los resultados se presentan en las 5 fichas siguientes:

Ficha de observación N° 1				
Fecha:	25/04/2017		Hora de inicio: 13:18	
Radiación:	785 W / m ²			
Velocidad del viento:	0.52 m / s			
Temperatura ambiente:	23.90 °C			
Temperatura placa de cubierta:	32.5°C	33.5°C	32.8°C	32.6°C
Tipo de cubierta:	Lisa	Cuadrada	Triangular	Hexagonal
Temperatura placa absorbadora:	39°C	48°C	47°C	45°C

Cuadro 2

Ficha de observación N° 2				
Fecha:	26/04/2017		Hora de inicio: 12:25	
Radiación:	1020 W / m ²			
Velocidad del viento:	0.82 m / s			
Temperatura ambiente:	24.60 °C			
Temperatura placa de cubierta:	34.6°C	39.5°C	38.8°C	40.2°C
Tipo de cubierta:	Lisa	Cuadrada	Triangular	Hexagonal
Temperatura placa absorvedora:	40°C	45°C	44°C	43°C

Cuadro 3

Ficha de observación N° 3				
Fecha:	27/04/2017		Hora de inicio: 14:35	
Radiación:	985.6 W / m ²			
Velocidad del viento:	1.23 m / s			
Temperatura ambiente:	24.50 °C			
Temperatura placa de cubierta:	40.5°C	41.2°C	42.6°C	41.8°C
Tipo de cubierta:	Lisa	Cuadrada	Triangular	Hexagonal
Temperatura placa absorvedora:	41°C	49°C	47°C	46°C

Cuadro 4

Ficha de observación N° 4				
Fecha:	28/04/2016		Hora de inicio: 15:20	
Radiación:	840 W / m ²			
Velocidad del viento:	1.45 m / s			
Temperatura ambiente:	24.70 °C			
Temperatura placa de cubierta:	38.30°C	39.50°C	40.20°C	40.40°C
Tipo de cubierta:	Lisa	Cuadrada	Triangular	Hexagonal
Temperatura placa absorvedora:	40°C	46°C	45°C	44°C

Cuadro 5

Ficha de observación N° 5				
Fecha:	29 /04/2017		Hora de inicio: 13:18	
Radiación:	952 W / m ²			
Velocidad del viento:	0.98 m / s			
Temperatura ambiente:	24.90 °C			
Temperatura placa de cubierta:	32.5°C	33.5°C	34.5°C	33.9°C
Tipo de cubierta:	Lisa	Cuadrada	Triangular	Hexagonal
Temperatura placa absorvedora:	42°C	50°C	48°C	47°C

Cuadro 6

Como se puede observar en las fichas de observación, la geometría cuadrada es la que mayor calentamiento de la placa absorvedora produce.

3.2 Flujo de aire caliente

Se activa el ventilador (blower) instalado en el difusor de entrada, para cada nivel de flujo de éste, se mide en el ducto del difusor de salida la temperatura y la velocidad del flujo. El flujo en la entrada se considera igual al flujo de salida, ya que la canal del colector es un dispositivo completamente estanco y la temperatura es la del ambiente, dado que no se dispone de calentador de flujo a la entrada.

Con el dato de la temperatura del aire a la salida, empleando las tablas psicométricas del aire, mediante interpolación se obtiene el volumen específico; aplicando fórmulas geométricas se obtiene el valor del caudal métrico del flujo y dividiendo el caudal para el volumen específico se obtiene el flujo másico, en las tablas que a continuación se exponen,

los flujos másicos: $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7$ corresponden a los diversos flujos que puede dar el ventilador. Se elaboran cuatro tablas correspondientes a cada uno de los tratamientos del plan de experimentación factorial.

Tabla 6. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 1

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	33.50	0.8686	3.70	0.0046	0.00535
m_2	33.09	0.8672	4.25	0.0053	0.00616
m_3	29.4	0.8576	4.85	0.0061	0.00711
m_4	28.40	0.8540	5.20	0.0065	0.00765
m_5	28.30	0.8537	5.75	0.0072	0.00846
m_6	27.60	0.8518	6.10	0.0077	0.00900
m_7	26.50	0.8517	6.65	0.0084	0.00981

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 1

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	37.40	0.8798	3.70	0.0046	0.00528
m_2	36.85	0.87905	4.25	0.0053	0.00608
m_3	35.30	0.87357	4.85	0.0061	0.00698
m_4	34.60	0.87162	5.20	0.0065	0.00750
m_5	33.45	0.87149	5.75	0.0072	0.00829
m_6	32.00	0.86450	6.10	0.0077	0.00887
m_7	31.30	0.86219	6.65	0.0084	0.00969

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 1

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	38.70	0.88349	3.70	0.0046	0.00526
m_2	37.85	0.88025	4.25	0.0053	0.00607
m_3	36.82	0.87314	4.85	0.0061	0.00698
m_4	35.68	0.87656	5.20	0.0065	0.00745
m_5	34.41	0.87110	5.75	0.0072	0.00829
m_6	33.52	0.86865	6.10	0.0077	0.00882
m_7	32.74	0.86650	6.65	0.0084	0.00964

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 1

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	33.50	0.8686	3.70	0.0046	0.00535
m_2	33.09	0.8672	4.25	0.0053	0.00616
m_3	29.4	0.8576	4.85	0.0061	0.00711
m_4	28.40	0.8540	5.20	0.0065	0.00765
m_5	28.30	0.8537	5.75	0.0072	0.00846
m_6	27.60	0.8518	6.10	0.0077	0.00900
m_7	26.50	0.8517	6.65	0.0084	0.00981

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 2

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	32.00	0.8645	3.70	0.0046	0.00538
m_2	31.00	0.8612	4.25	0.0053	0.00620
m_3	30.35	0.8593	4.85	0.0061	0.00709
m_4	29.52	0.8570	5.20	0.0065	0.00762
m_5	28.43	0.8542	5.75	0.0072	0.00846
m_6	27.56	0.8517	6.10	0.0077	0.00910
m_7	26.72	0.8493	6.65	0.0084	0.00984

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 2

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	39.00	0.8843	3.70	0.0046	0.00526
m_2	38.56	0.8831	4.25	0.0053	0.00605
m_3	37.00	0.8786	4.85	0.0061	0.00694
m_4	36.21	0.8762	5.20	0.0065	0.00746
m_5	35.00	0.8727	5.75	0.0072	0.00828
m_6	34.25	0.8707	6.10	0.0077	0.00880
m_7	33.00	0.8672	6.65	0.0084	0.00964

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 2

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	38.00	0.8816	3.70	0.0046	0.00527
m_2	37.12	0.8790	4.25	0.0053	0.00608
m_3	36.00	0.8756	4.85	0.0061	0.00696
m_4	35.67	0.8746	5.20	0.0065	0.00747
m_5	34.00	0.8700	5.75	0.0072	0.00831
m_6	33.51	0.8686	6.10	0.0077	0.00882
m_7	32.73	0.8665	6.65	0.0084	0.00964

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 2

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	39.00	0.8843	3.70	0.0046	0.00526
m_2	38.00	0.8816	4.25	0.0053	0.00606
m_3	37.45	0.8783	4.85	0.0061	0.00694
m_4	36.00	0.8756	5.20	0.0065	0.00746
m_5	35.41	0.8739	5.75	0.0072	0.00827
m_6	34.00	0.8700	6.10	0.0077	0.00881
m_7	33.62	0.8689	6.65	0.0084	0.00962

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 3

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	38.00	0.8756	3.70	0.0046	0.00531
m_2	37.50	0.8771	4.25	0.0053	0.00609
m_3	36.00	0.8756	4.85	0.0061	0.00696
m_4	35.74	0.8748	5.20	0.0065	0.00747
m_5	34.00	0.8700	5.75	0.0072	0.00831
m_6	33.76	0.8633	6.10	0.0077	0.00888
m_7	32.00	0.8645	6.65	0.0084	0.00967

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 3

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	41.00	0.8900	3.70	0.0046	0.00522
m_2	40.00	0.8871	4.25	0.0053	0.00602
m_3	39.00	0.8843	4.85	0.0061	0.00689
m_4	38.24	0.8822	5.20	0.0065	0.00741
m_5	37.00	0.8786	5.75	0.0072	0.00822
m_6	36.52	0.8772	6.10	0.0077	0.00874
m_7	36.00	0.8756	6.65	0.0084	0.00954

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 3

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	38.00	0.8816	3.70	0.0046	0.00527
m_2	37.20	0.8792	4.25	0.0053	0.00607
m_3	37.00	0.8786	4.85	0.0061	0.00694
m_4	36.00	0.8756	5.20	0.0065	0.00746
m_5	36.21	0.8762	5.75	0.0072	0.00825
m_6	35.00	0.8727	6.10	0.0077	0.00878
m_7	35.62	0.8745	6.65	0.0084	0.00956

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 3

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	40.00	0.8871	3.70	0.0046	0.00524
m_2	39.00	0.8843	4.25	0.0053	0.00604
m_3	38.00	0.8816	4.85	0.0061	0.00691
m_4	37.65	0.8805	5.20	0.0065	0.00742
m_5	36.00	0.8756	5.75	0.0072	0.00825
m_6	35.67	0.8746	6.10	0.0077	0.00876
m_7	35.00	0.8727	6.65	0.0084	0.00958

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 4

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	32.00	0.8645	3.70	0.0046	0.00538
m_2	31.00	0.8612	4.25	0.0053	0.00620
m_3	30.52	0.8598	4.85	0.0061	0.00709
m_4	29.00	0.8556	5.20	0.0065	0.00764
m_5	28.61	0.8545	5.75	0.0072	0.00846
m_6	28.00	0.8529	6.10	0.0077	0.00899
m_7	27.00	0.8501	6.65	0.0084	0.00983

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 4

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	39.00	0.8932	3.70	0.0046	0.00521
m_2	38.00	0.8900	4.25	0.0053	0.00600
m_3	37.00	0.8880	4.85	0.0061	0.00686
m_4	36.00	0.8843	5.20	0.0065	0.00739
m_5	35.00	0.8816	5.75	0.0072	0.00820
m_6	34.00	0.8786	6.10	0.0077	0.00872
m_7	33.00	0.8756	6.65	0.0084	0.00954

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Caudal másico, cubierta triangular, ficha de observación 4

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	39.25	0.8892	3.70	0.0046	0.00523
m_2	38.00	0.8816	4.25	0.0053	0.00606
m_3	37.00	0.8786	4.85	0.0061	0.00694
m_4	36.62	0.8775	5.20	0.0065	0.00745
m_5	35.72	0.8748	5.75	0.0072	0.00826
m_6	35.00	0.8727	6.10	0.0077	0.00878
m_7	34.00	0.8700	6.65	0.0084	0.00961

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 4

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	41.00	0.8900	3.70	0.0046	0.00522
m_2	40.00	0.8871	4.25	0.0053	0.00602
m_3	39.00	0.8843	4.85	0.0061	0.00689
m_4	38.72	0.8835	5.20	0.0065	0.00740
m_5	37.51	0.8801	5.75	0.0072	0.00821
m_6	36.00	0.8756	6.10	0.0077	0.00875
m_7	35.00	0.8727	6.65	0.0084	0.00958

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Caudal másico, cubierta continua, ficha de observación 5

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	37.00	0.8786	3.70	0.0046	0.00529
m_2	36.00	0.8756	4.25	0.0053	0.00610
m_3	35.00	0.8727	4.85	0.0061	0.00698
m_4	34.00	0.8700	5.20	0.0065	0.00751
m_5	33.52	0.8687	5.75	0.0072	0.00832
m_6	33.00	0.8672	6.10	0.0077	0.00884
m_7	32.00	0.8645	6.65	0.0084	0.00967

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 5

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	41.00	0.8900	3.70	0.0046	0.00522
m_2	40.00	0.8871	4.25	0.0053	0.00602
m_3	39.00	0.8843	4.85	0.0061	0.00689
m_4	38.00	0.8816	5.20	0.0065	0.00741
m_5	37.51	0.8801	5.75	0.0072	0.00821
m_6	36.53	0.8772	6.10	0.0077	0.00874
m_7	35.00	0.8727	6.65	0.0084	0.00958

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Caudal másico, cubierta cuadrada, ficha de observación 5

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	37.00	0.8786	3.70	0.0046	0.00529
m_2	36.00	0.8756	4.25	0.0053	0.00610
m_3	35.00	0.8727	4.85	0.0061	0.00698
m_4	34.00	0.8700	5.20	0.0065	0.00751
m_5	33.43	0.8684	5.75	0.0072	0.00832
m_6	32.73	0.8665	6.10	0.0077	0.00885
m_7	31.21	0.8619	6.65	0.0084	0.00970

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Caudal másico, cubierta hexagonal, ficha de observación 5

Tipo de flujo	Temperatura [°C]	Volumen específico [m ³ / kg]	Velocidad de flujo [m / s]	Caudal [m ³ / s]	Caudal másico [kg / s]
m_1	41.00	0.8900	3.70	0.0046	0.00522
m_2	40.21	0.8884	4.25	0.0053	0.00601
m_3	39.00	0.8843	4.85	0.0061	0.00689
m_4	38.00	0.8816	5.20	0.0065	0.00741
m_5	37.00	0.8786	5.75	0.0072	0.00822
m_6	36.53	0.8772	6.10	0.0077	0.00874
m_7	35.00	0.8727	6.65	0.0084	0.00958

Fuente: Elaboración propia

3.3 Cálculo del rendimiento η_{II}

Para el cálculo del rendimiento desde el punto de vista de la exergía η_{II} , se emplea la fórmula 30

$$\eta_{II} = 1 - \frac{I}{A_c * H_t * (\tau * \alpha) * \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right]}$$

$$I = A_c * H_t * (\tau * \alpha) \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right] - \dot{m} * c_p * (T_s - T_e) - \dot{m} * T_a * (S_s - S_e)$$

Donde:

$A_c \equiv$ Área efectiva del colector 0.5 m^2

$H_t \equiv$ Energía solar incidente sobre el plano $[\text{W}/\text{m}^2]$

$\tau \equiv$ transmitancia para el vidrio: 0.86

$\alpha \equiv$ Absortancia de la pintura negro mate sobre substrato metálico: 0.97

$(\tau * \alpha) = 0.8342$

$T_a \equiv$ Temperatura del ambiente

$T_{sol} \equiv 5778^\circ\text{K} = 5505^\circ\text{C}$

$\dot{m} \equiv$ Flujo másico de aire depende de la velocidad del blower valores tabulados

$\rho_{aire} \equiv 1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$

$C_p \equiv$ Calor específico a presión constante = $1006.43 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}$

$k \equiv$ Conductividad térmica = $0,0242 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}$

$\mu \equiv$ Viscosidad del aire = $1.874 * 10^{-5} \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}$

$S_e \equiv$ Entalpía del aire a la entrada

$S_s \equiv$ Entalpía del aire a la salida.

Los resultados guardan estrecha similitud en las tablas de caudal másico, por tanto se realiza el análisis del rendimiento de acuerdo a la entropía, para la tabla más significativa, que se considera tal a la que mayores temperaturas de flujo presenta, la tabla de caudal másico con cubierta cuadrada y ficha de observación cuatro, los resultados se presentan en el modelo de la tabla 5 plan de bloques.

Tabla 26. Rendimientos

Bloques	Tratamientos			
	PC1	PC2	PC3	PC4
m_1	0.5351	0.9825	0.7345	0.7132
m_2	0.5040	0.9345	0.7241	0.6952
m_3	0.5010	0.8542	0.7021	0.6128
m_4	0.4534	0.8152	0.6854	0.5876
m_5	0.4221	0.7135	0.6135	0.5528
m_6	0.4135	0.7135	0.6135	0.5528
m_7	0.4065	0.6543	0.5985	0.5464

De la tabla de rendimientos se escoge el tratamiento PC₂ que corresponde a la utilización de la cubierta cuadrada y con los datos de la tabla 19, se grafica el rendimiento vs temperatura del flujo a la salida del colector.

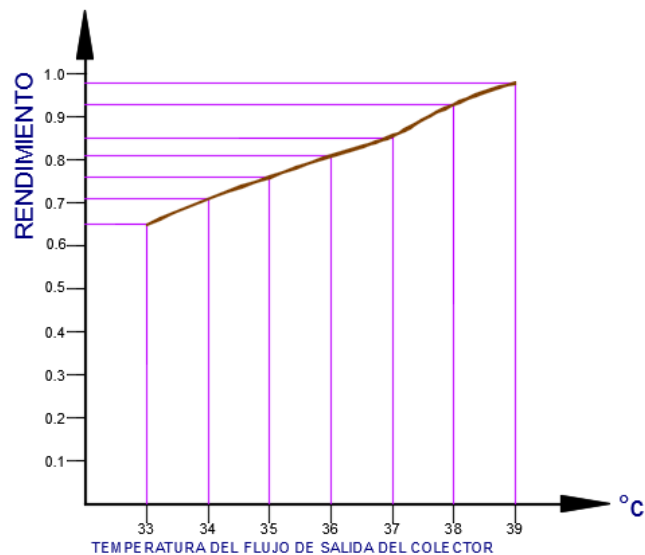


Figura 29. Rendimiento η_{II} vs Temperatura de salida

Fuente: Elaboración propia

Solo se grafica como ejemplo un tratamiento para los 7 valores de flujo másico dado por las tablas, los demás gráficos serían similares, siempre indicando que a menor flujo másico, mayor temperatura de salida y mayor rendimiento.

3.4 Análisis estadístico de la tabla de rendimientos

En la tabla 26 a las columnas se denominan tratamientos T y a las filas se denominan bloques B, se suman y se calcula la media del grupo de datos que conforman la fila o la columna como indica la tabla 27

Tabla 27. Totales y medias

Bloques	Tratamientos				Total	Media
	PC1	PC2	PC3	PC4		
m_1	0.5351	0.9825	0.7345	0.7132	$B_1=2.9653$	$b_1=0.741325$
m_2	0.5040	0.9345	0.7241	0.6952	$B_2=2.8578$	$b_2=0.71445$
m_3	0.5010	0.8542	0.7021	0.6128	$B_3=2.6710$	$b_3=0.667525$
m_4	0.4534	0.8152	0.6854	0.5876	$B_4=2.5416$	$b_4=0.6354$
m_5	0.4221	0.7654	0.6584	0.5634	$B_5=2.3019$	$b_5=0.57547$
m_6	0.4135	0.7135	0.6135	0.5528	$B_6=2.2933$	$b_6=0.573325$
m_7	0.4065	0.6543	0.5985	0.5464	$B_7=2.2057$	$b_7=0.55142$
Total	$T1=3.2356$	$T2=5.7196$	$T3=4.7165$	$T4=4.2714$	$G=17.84$	
Media	$t1=0.4622$	$t2=0.8171$	$t3=0.6738$	$t4=0.6102$		

Fuente: Elaboración propia

Según Natrella 2012 el análisis de un experimento de bloques aleatorizados se bas en varios supuestos: se supone que cada observación es la suma de tres componentes que se expresan de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \phi_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

- $Y_{ij} \equiv$ Observación del tratamiento i del bloque j
 $\emptyset_i \equiv$ Término característico del tratamiento i
 $\epsilon_{ij} \equiv$ Error experimental correspondiente a la medida Y_{ij}

3.4.1 Estimación de los efectos de los tratamientos

Se sigue el siguiente proceso

1. Elegir α el nivel de significancia de la prueba: para este caso $\alpha = 0,05$
2. Determinar los grados de libertad $\nu = (b - 1)*(t - 1)$ en el presente estudio

$$\nu = (7 - 1)*(4 - 1) = 18.$$

3. Determinar el valor de $q_{1-\alpha}(t, \nu)$, para este caso $q_{0,95}(4, 18) = 4,35$ tabla D2 (Duncan, 2012).
4. Calcular la suma de los cuadrados de los tratamientos:

$$SS_t = \frac{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + T_4^2}{b} - \frac{G^2}{t*b} = \frac{3,2356^2 + 5,7196^2 + 4,7165^2 + 4,2714^2}{7} - \frac{17,84^2}{28} = 0,5867$$

5. Calcular la suma de los cuadrados de los bloques

$$SS_b = \frac{B_1^2 + \dots + B_7^2}{t} - \frac{G^2}{tb} = \frac{45,97707}{28} - \frac{17,84^2}{28} = 0,1276389$$

6. Calcular la suma de los productos:

$$SS = \sum_{i=1}^t Y_i * \sum_{j=1}^b Y_j - \frac{G^2}{tb} = 319,41$$

7. Calcular el cuadrado de la desviación estándar y la desviación estándar

$$s^2 = \frac{SS - SS_b - SS_t}{(b-1)(t-1)} = \frac{319,41 - 0,127639 - 0,5867}{18} = 17,70$$

$$s = \sqrt{17,70} = 4,21$$

8. Calcular el factor w



$$w = \frac{q_1 - s}{\sqrt{b}} = \frac{4,35 - 4,21}{\sqrt{7}} = 0,052915$$

Dado que la diferencia absoluta entre dos efectos de tratamiento estimados excede el valor de w , se puede afirmar que los efectos de los tratamientos difieren. Se puede afirmar con una confianza $1 - 0,05 = 0,95 = 95\%$ que todas las afirmaciones son simultáneamente ciertas, lo que comprueba la hipótesis inicial.

CONCLUSIONES

1. El colector solar de placas planas en estudio, frente al calentamiento solar, genera espontáneamente un pequeño flujo de aire caliente que escapa por el terminal del difusor de salida. Despreciando este flujo por pequeño se pueden asumir condiciones cuasi estáticas, para las cuales el calentamiento de la placa absorbadora depende exclusivamente de la radiación solar incidente.
2. El fenómeno físico de la mejora del calentamiento empleando cubierta discontinua planteada en la hipótesis se cumple, además existe la garantía que el prototipo construido y probado es completamente aleatorizado en todas sus dimensiones.
3. La configuración geométrica de las placas discontinuas es una tarea muy ardua por cuanto no existe producción de los elementos geométricos y es necesario construirlos con piezas cortadas de láminas de vidrio, donde los cortes no tienen precisión en las dimensiones y las figuras no son completamente uniformes, además el elemento de pega de las partes es difícil de encontrar, se requiere un material translucido que a la vez que une de consistencia a la lámina discontinua, en el presente proyecto se empleó masilla epóxica, un material que da consistencia pero no es translúcido.
4. Se pudo establecer que a menor flujo másico de aire el rendimiento es mayor y mayor la temperatura del flujo, porque el flujo de aire tiene más tiempo para remover el calor de la placa absorbadora. La cantidad de aire caliente suministrada por el colector solar es un compromiso entre las dimensiones del mismo y el costo de los materiales y fabricación.

5. El propósito de utilizar cubiertas discontinuas es evitar enfriamiento por las corrientes de viento, propósito que se cumple, porque en cualquier momento el viento siempre está presente y la configuración geométrica no le permite llegar a la placa de cubierta, además la placa absorbedora tarda más tiempo enfriarse.

6. Queda demostrado que puede desarrollarse un proyecto de mejoramiento de la eficiencia a costos muy bajos y empleando una tecnología básica. Los actuales colectores solares de placa plana para agua caliente sanitaria, pueden ser mejorados en su rendimiento mediante el uso de cubiertas discontinuas.

7. No es necesario que los bordes inferiores de las figuras geométricas se sitúen completamente sobre la placa de cubierta, pueden quedar a una prudente distancia de ésta, generalmente de 2 a 3 mm, para permitir el flujo de agua en caso de lluvia y poder retirar el polvo y residuos mediante chorro de aire o agua.

8. No fue posible construir una placa de cubierta discontinua con anillos circulares de vidrio, éstos no se venden en el país y es muy difícil encontrarlos para importación, además el costo de fabricación especial los hace inalcanzables con uno de los postulados del proyecto, costo bajo y tecnología común, se pensó en cortar anillos de vidrio empleado botellas, pero éstos elementos no son simétricos y no permiten ser rayados empleando un torno, la falta de simetría y la punta de vidrio empleada hace que se produzcan demasiados planos de corte y estallan.

RECOMENDACIONES

1. En el presente proyecto se empleó vidrio para la construcción de las placas discontinuas para estar en concordancia con el material empleado en la cubierta, podría probarse con otros materiales como plásticos PVC o resinas, con los que podrían construirse diversas configuraciones geométricas y existe más facilidad para el pegado o junta mediante tornillos.
2. El tipo de figuras y formas, las dimensiones de los lados y en especial la altura de las láminas, son datos completamente aleatorizados, debe existir una altura de lámina y dimensiones que optimicen los resultados, esos temas quedaron desde el comienzo fuera del alcance del presente proyecto.
3. Los materiales utilizados en la construcción, son materiales que se pueden encontrar en el mercado local, de cualquier ferretería del país, no se empleó soldadura para la construcción, se empleó remaches pop y donde fue necesario, para lograr la estanqueidad de la juntas se utilizó masilla epóxica, lo cual no encarece los costos y facilita el desmontaje para mantenimiento, pero existe información técnica relacionada con el empleo de madera para la construcción de colectores solares y cubiertas translúcidas de PVC, dato que tampoco fue analizado en el presente proyecto.
4. La remoción de calor de la placa absorbadora en el presente proyecto es de la forma tradicional por convección, pero se debe tomar en cuenta que es baja, para mejorar este parámetro se están empleando placas con resaltes superficiales (placas antideslizantes) o piezas metálicas soldadas verticalmente a la placa absorbadora,

de manera que el flujo disminuya su velocidad y tenga tiempo de absorber en mejor forma el calor, es un tema que también puede ser investigado. De la misma forma se están utilizando latas vacías de gaseosas y placas metálicas onduladas para aumentar el área de recolección en la placa absorbadora.

5. El aislante térmico utilizado fue espuma de poliuretano de celda cerrada, pero también se podría utilizar aislantes térmicos naturales como arena fina purificada, paja de cebada o arroz, serrín de madera, cabuya, madera de balsa, piedra pómez y una variedad de materiales muy conocidos en nuestro medio.

6. El colector solar de placa plana, es un elemento que puede ser dedicado a los procesos de deshidratado de frutos y especies vegetales aromáticas a pequeña escala, a gran escala se lo puede utilizar en el secado de madera.

7. Las dimensiones se obtienen de la cantidad de energía térmica que requiera un proyecto específico, porque no existe en la industria nacional un prototipo de donde obtener sus medidas

CAPITULO IV

PROPUESTA

4.1 TÍTULO

Generación de aire caliente mediante energía solar

4.2 JUSTIFICACIÓN

La sociedad actual precisa de grandes cantidades de energía para el desarrollo de sus actividades, ya sean de producción de calor o transporte, esta energía generalmente viene suministrada por fuentes de combustible fósiles principalmente porque las fuentes nucleares que se suponían eran la solución, no han sido muy útiles, debido a las complicaciones de funcionamiento y la generación de residuos contaminantes. La utilización de combustibles de origen fósil tiene la desventaja que contamina el ambiente y contribuye a los efectos del cambio climático que está soportando todo el planeta. La sociedad actual está obligada a cambiar su paradigma energético empleado fuentes alternativas no contaminantes que favorezcan el ahorro energético de los combustibles no renovables.

Se conoce que el aire no es el mejor material para trabajos térmicos, su baja densidad, la poca capacidad calorífica y la escasa conductividad térmica, hacen que los dispositivos que trabajan con aire como fluido de trabajo tengan bajos coeficientes de rendimiento. Estas complicaciones podrían solucionarse en parte mejorando el contacto del fluido con la fuente de calor y produciendo flujos turbulentos con elevados números de Reynolds.

Se ha desarrollado en el trabajo de investigación previo, la tecnología para construir colectores solares de placa plana, capaces de producir aire caliente a temperaturas suficientes como para poder ser utilizado en los procesos de deshidratado de vegetales.

La aplicación de los conceptos adquiridos a un proyecto de mayores dimensiones proporciona la certeza de poder hacer el equipo sin correr el riesgo de falla en el funcionamiento. Un proceso de construcción real como éste, deja experiencias beneficiosas en cuanto a costos, materiales y tareas de construcción y montaje, así como pesos y volúmenes para el transporte y la forma de ubicación.

La construcción de un dispositivo mecánico de dimensiones reales, tiene la ventaja que provee de información real y definitiva, un prototipo, siempre será un modelo escalado, que responde a condiciones específicas del momento de prueba. Además el modelo real permite salir con la propuesta al mercado, porque todos estamos de acuerdo que los equipos tengan las dimensiones estandarizadas, es decir que las dimensiones de funcionamiento las vamos aprendiendo día tras día .

4.3 OBJETIVO GENERAL

Construir un colector solar de aire placa plana de doble flujo con sobre cubierta discontinua de geometría cuadrangular, para la producción de aire caliente destinado al secado de especies vegetales aromáticas.

4.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el diseño correspondiente y especificar los materiales necesarios para la construcción del equipo.
2. Construir y montar las piezas para obtener el equipo
3. Realizar pruebas de funcionamiento

4.4 ESTRUCTURA DE LA PROPUESTA

Un caso real es el secado de especies aromáticas, mediante la utilización de secadores solares indirectos. Cuando se habla de secado de especies aromáticas a nivel industrial, se

requiere aire con temperaturas de 28 – 40 °C, la cantidad depende del número de cambios de aire por hora necesarios para retirar la humedad de las hojas y tallos de las especies sometidas a secado.

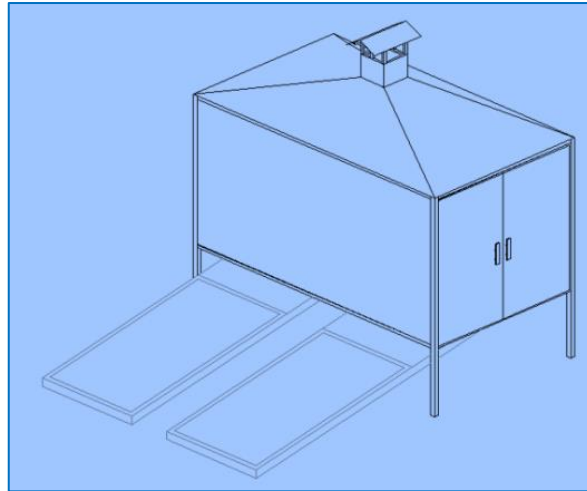


Figura 30. Secador solar indirecto

Fuente: Elaboración propia

La estructura de la propuesta en mi concepto debe considerar principalmente los siguientes ítems:

1. Operacionalidad
2. Tipo de colector solar
3. Capacidad de producción de aire caliente
4. Cantidad de materiales necesarios
5. Costo de producción unitaria
6. Ventilador de impulsión del aire
7. Equipo de medición

4.5 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.5.1 Operacionalidad

El equipo de la propuesta se diseñará pensando que va a operar en las localidades de la Región 3 Sierra Centro Norte, localizadas entre los 2200 – 3800 m.s.n.m,

fundamentalmente los materiales metálicos no tienen la restricción de la altura geográfica, pero los motores eléctricos como es el caso del motor del ventilador deberá escogerse con un cuarto de potencia nominal en exceso para prevenir la pérdida por altura geográfica. El ángulo de inclinación del colector respecto del plano del suelo, va a depender de la latitud de la zona, por la cercanía a la línea ecuatorial el ángulo de inclinación será de hasta 15° . Se proyecta un equipo de trabajo fijado al suelo no ubicado en los techos de las casas, por tanto tendrá un soporte metálico que lo mantiene sobre el piso, evitando la acción de la humedad.

4.5.2 Tipo de colector solar.

De acuerdo con la investigación previa, el colector será de placa plana, con sobrecubierta discontinua con figuras geométricas cuadradas, a priori se puede pensar en cuadrados hechos en lámina de vidrio de 3 mm de espesor, de 10 cm de lado. Generalmente se estima un colector de baja temperatura por que opera a menos de 100°C , temperatura suficiente para el deshidratado de especies aromáticas.

Una vez que se ha determinado con certeza, la incidencia positiva del uso de cubiertas discontinuas en el calentamiento de la placa absorbadora, es deseable aplicar este conocimiento adquirido ya no a la elaboración de un prototipo, sino de un colector solar de dimensiones estandarizadas, que se sabe por experiencia previa funcionan en el calentamiento de agua $1.50\text{ m}^2 \leq A_c \leq 2.6\text{ m}^2$, el área del colector A_c será de 2.0 m de largo por 1.25 m de ancho, es decir 2.50 m^2 .

Se pudo determinar que la lámina de acero galvanizada galga 22 es suficiente para obtener una caja de rigidez adecuada, la espuma de poliuretano de 10 mm de espesor es un buen aislante térmico y el vidrio flotado de 5 mm de espesor para la cubierta es suficiente; obviamente se montarán las lámina del colector de la propuesta con remaches pop.

Las regletas de vidrio para construir las figuras cuadradas deberán hacerse en vidrio de 3 mm de espesor, ya que éste es el material que se encuentra en cualquier lado, un buen corte

y para el armado se pueden utilizar unos mecanismos tipo Cruz de Malta hechos en aluminio y que se pueden conseguir en los almacenes de venta de aluminio.

Respecto del flujo, deberá ser de doble flujo, es decir que el aire circule por ambas caras de la placa absorbadora, se ha visto que este procedimiento da buenos resultados, la placa absorbadora deberá ser de aluminio galga 22, pintada la cara superior con pintura de óxido de aluminio color negro mate. La distancia entre la placa absorbadora y la cubierta y entre la placa y el fondo deberá ser como máximo de 0.04 m.

4.5.3 Capacidad de producción de aire caliente

De acuerdo a las dimensiones del prototipo, éste está en capacidad de producir 4000 cm^3 de aire caliente, porque ese es el volumen interior de su cámara, para las condiciones dimensionales de la propuesta el volumen interior será de 250000 cm^3 , o sea un volumen 62.5 veces mayor. La temperatura se especificó entre 20 y 40°C . En el prototipo se empleó un ventilador de 600 W de potencia con un flujo máximo de $3.5 \text{ m}^3 / \text{h}$, en la propuesta se deberá emplear un ventilador de mucha mayor capacidad 2.5 HP o 2 kW, con un flujo de por lo menos $12 \text{ m}^3 / \text{h}$.

En el prototipo una lámina de aluminio 6160 de 1.5 mm de espesor y de dimensiones: 0.5 m de ancho y 1 m de largo, se puede mantener el flujo de calor por lo menos 5 minutos antes que comience a bajar la temperatura de la placa absorbadora, la cubierta discontinua de vidrio evita el enfriamiento de ésta, hasta que vuelva a brillar el Sol. Una placa de mayores dimensiones podrá mantener el calor por mucho más tiempo.

El ventilador industrial de mayor potencia tiene un tiempo de trabajo más largo, que el ventilador utilizado en el prototipo cuyo tiempo de funcionamiento era solo de 15 minutos. Un colector de mayor tamaño podrá mantener el proceso no solo de uno sino de dos o más hornos de deshidratación simultáneamente.

4.5.4 Materiales y costos unitarios de producción

A partir de los planos de construcción se pueden estimar los materiales y el costo.

Materiales				
Denominación	Unidad	Cantidad	Precio unitario [USD/Unidad]	Precio total [USD]
Ángulo de acero 40x40x3 mm	Áng	6	16.00	96.00
Lámina estándar de acero galvanizado galga 22	PL	6	18.50	111.00
Plancha de vidrio flotado. L=2m, A = 1.20 m, e= 0.005 m	Pl vid	1	55	55.00
Aislante térmico film de poliéster aluminizado TBA 10	m	6	12.5	75.00
Láminas de vidrio flotado: L = 1.20 m, A = 0.02m, e = 0.003m	Unidad	15	1.20	18.00
Láminas de vidrio flotado: L = 0.1 m, A = 0.02m, e = 0.003m	Unidad	200	0.70	140.00
Plancha Estándar de aluminio 6160	Pl alum	1	75	75.00
Ángulo de aluminio 25x25x1.5mm	Unidad	6	8.50	51.00
Sello de caucho para vidrios	m	15	0.75	11.25
Soporte para vidrios de 3 mm	Unidad	50	1.20	60
Total materiales:				632.25

Cuadro 7.

Insumos				
Denominación	Unidad	Cantidad	Precio unitario [USD/Unidad]	Precio total [USD]
Electrodo E 6011 1/8	kg	2	5.00	10.00
Remaches pop 3/16 x 1/4	Caja	1	8.50	8.50
Pintura fondo anticorrosivo gris	Galón	1	24.70	24.70
Imprevistos	Unidad	1	200.00	200.00
Total insumos:				243.20

Cuadro 8

Equipamiento				
Denominación	Unidad	Cantidad	Precio unitario [USD/Unidad]	Precio total [USD]
Motoventilador 3 HP	Unidad	1	450.00	450.00
Extensión eléctrica	Unidad	1	35.00	35.00
Termoanemómetro	Unidad	1	250.00	250.00
Termómetro infrarrojo	Unidad	1	350.00	350.00
Piranómetro	Unidad	1	450.00	450.00
Multímetro digital	Unidad	1	80.00	80.00
Total equipamiento:				1615.00

Cuadro 9



Mano de obra directa				
Denominación	Unidad	Cantidad	Precio unitario [USD/Unidad]	Precio total [USD]
Mecánico soldador y ajustador	HHM	80	3.50	280.00
Ayudante de mecánico	HHM	80	2.00	160.00
Total materiales:				440.00

Cuadro 10

Mano de obra indirecta				
Denominación	Unidad	Cantidad	Precio unitario [USD/Unidad]	Precio total [USD]
Supervisión técnica	HHM	10	12.00	120.00
Transporte de materiales	Viaje	4	25.00	100.00
Total materiales:				220.00

Cuadro 11

Costo total de producción antes de impuestos: 3150.45 USD

Costo final: 3528.50 USD

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, G., Arce, J., Lira, L., Heras, M., 2004. *Thermal performance od an air solar collector with an absorber plate made of recyclable aluminium cans*. Solar Energy, Vol77, N°1, pp. 107 – 113.

Ammari, S., *A mathematical model of thermal performance of a solar air heater with slats*. Renewable Energy, Vol. 28, N° 10, pp. 1597 – 1615.

ASHRAE STANDAR 93 -77, 1977. *Methods of testing to determine the thermal Performance of Solar Collector*. The American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. Inc. New York, N.Y.

Ávila, A., Mendoza, J., Beltrán, J., 2010. *Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta*. Ingeniería y Desarrollo, N° 27, pp. 96 – 103.

Cengiz, Y., Inci, T., Celal, S., Dursum, P., 2002. *Thermal efficiency of an air solar collector with extended absorption and increased convection*. International Communications in Heat and Mass transfer, Vol. 29, N°6, pp. 831 -840.

Concejo Nacional de Electrificación CONELEC, (2008). *Atlas solar del Ecuador*, p. 48. Recuperado de:

<http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/003-10-GE-VIGENTE.pdf>

Cerón, J., 2012. *Análisis del mecanismo de transferencia de calor en colectores solares térmicos y de la influencia de las condiciones de contorno*. Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Cartagena

Comité Ejecutivo del Código Ecuatoriano de la Construcción, 2014. *Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC 10, parte 14-1*, Energía Renovable.

Charturverdi, S.A., Mohieldin, T., & Chen, 1991. *Second law analysis of solar assisted heat pumps*. Energy, Vol 16, N°6, pp. 941 -949.

Duffie & Becman (1992) Citado por: Faurox, L. (2012). El futuro de las energías alternativas. Recuperado de:<https://www.google.com.ec/search?q=WORDpress+com+2015+energia+solar&oq=WORDpress+com+2015+energia+solar&aqs=chrome..69i57.18556j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8#q=faurox+1+2012>

Duncan (2012). Control estadístico de calidad. Editorial Mc Graw Hill. N.Y, p. 423

Ecuador. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos MCPEC. *Políticas Energéticas* 2008 – 2020, pp. 18.

Ecuador. *Constitución de la República del Ecuador*, 2008, pp.14

Ecuador. *Plan Nacional del Buen Vivir*, 2013 - 2017, Objetivo 11, pp. 322

Evans, J., Schiller, S., 2013. *Promoción de Eficiencia Energética y Uso de Energía Solar en Vivienda del Ecuador*. Primer Congreso Internacional y Exposición Científica de Investigación Sostenible, Energías Renovables y Eficiencia Energética.

Fernández, P. (2012). *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*, España: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.

Faurox, L. (2012). *El futuro de las energías alternativas*, Recuperado de:



<https://www.google.com.ec/search?q=WORDpress+com+2015+energia+solar&oq=WORDpress+com+2015+energia+solar&aqs=chrome..69i57.18556j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8#q=faurox+l+2012>

Histórico climático para la ciudad de Latacunga, Recuperado de:

<http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Hottel-Willer (1992) citado por: Faurox, L. (2012). El futuro de las energías alternativas, recuperado

de:<https://www.google.com.ec/search?q=WORDpress+com+2015+energia+solar&oq=WORDpress+com+2015+energia+solar&aqs=chrome..69i57.18556j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8#q=faurox+l+2012>

Hikmet, E., 2008. *Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates*. Building and Environment, Vol. 43, N°6, pp. 1046 – 1054.

Humedad relativa (%) para los próximos 14 días en Latacunga, Recuperado de:

<http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Irfan, K., Aydin, D., 2004. *Efficiency and exergy analysis of a new solar air heater*. Renewable Energy, Vol. 29, n° 9, PP. 1489 – 1501.

Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología INAMHI, (2012). *Boletines Meteorológicos*. Recuperado de:

<https://www.google.com.ec/search?q=instituto+nacional+de+hidrologia+y+meteorologia+ecuador&oq=Instituto+nacional+de+hidrolog%3%ADa&aqs=chrome.2.69i57j015.23027j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

INTERNATIONAL ESTÁNDAR, ISO / FDIS 9806. 2013, *Solar energy, Solar thermal collectors, Test methods*. Switzerland.

Juran, JM. (2012) Manual de control de calidad. Editorial Mc Graw Hill. N.Y, p. 542

Lema, A., Pontin, M., Morsetto, J., Ruestch, L., 2011. *Diseño, Desarrollo y Análisis Térmico de un Colector Solar de Aire con Placa Plana, Eficiencia y Exergía Perdida*. Avances en energías Renovables y Medio ambiente. Vol. 15, pp. 02.15 – 02.21

Mohamad, A., 1997. *High efficiency solar air heater*. Solar Energy, Vol. 60, N°2, pp.71-76.

Moumami, N., Youcef-Ali, S., Moumami A., Desmons, J., 2004. *Energy analysis of a solar air collector with rows of fins*. Renewable Energy, Vol. 29, N° 13, pp. 2053 - 2064.

Natrella, R. (2012). Análisis estadístico de experimentos científicos. Manual de Control de Calidad de Juran & Juran. (2012). Editorial Mc Graw Hill. N.Y, p. 1234

Ong, K., 1995. *Thermal performance of solar air heaters-experimental correlation*. Solar Energy, Vol. 55, N°3, pp. 209 – 220.

Parker, B., Lindley, M., Colliver D., Murphy, E., 1993. *Thermal performance of three solar air heaters*. Solar Energy, Vol. 51, N° 6, pp. 467 – 479.



Presión atmosférica para los próximos 14 días en Latacunga, Recuperado de:

<http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Rodríguez, H. (2012). Diseño, construcción y caracterización de un colector solar plano de aire. Tesis de grado, Universidad de Santiago de Chile. Recuperado de:

<http://fisica.usach.cl/sites/fisica/files/tesis-hernan-rodriguez-valencia.pdf>

Revilla, J. (2012). *Transferencia de calor por convección*. Recuperado

[https://www.google.com.ec/search?q=revilla+2012&oq=revilla+2012&aqs=chrome..69i57j0.20441j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-](https://www.google.com.ec/search?q=revilla+2012&oq=revilla+2012&aqs=chrome..69i57j0.20441j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8#q=revilla+2012+transferencia+de+calor)

[8#q=revilla+2012+transferencia+de+calor](https://www.google.com.ec/search?q=revilla+2012&oq=revilla+2012&aqs=chrome..69i57j0.20441j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8#q=revilla+2012+transferencia+de+calor)

Serway, R., Hewett, J., 2008. *Física para Ciencia e Ingeniería*. Vol 1, Editec S.A de C.V, México, pp. 135.

Temperaturas máximas y mínimas medias para los próximos 14 días en Latacunga

Recuperado de: <http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Turhan, K., 2006. *Performance of various designs of solar air heaters for crop drying applications*. Renewable Energy, Vol. 31, N° 7, pp. 1073 – 1088.

Variación de temperatura en Latacunga (2016) Recuperado de:

<http://www.vivelatacunga.com/info-basica/>

Velocidad del viento para los próximos 14 días en Latacunga, Recuperado de:

<http://www.meteored.com.ec/meteogramas>

Zabalsa, B., Aranda A., 2009. *Energía solar Térmica*, Prensas Universitarias de Zaragoza, pp.64.



Zonas del Ecuador según Irradiación solar, Norma NEC 10 (2017) Recuperado de:
<https://www.google.com.ec/search?q=normas+nec+2017&oq=normas+nec&aqs=chrome.5.69i57j0l5.10453j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>