

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS, FÍSICAS Y QUÍMICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TEMA:

ESTUDIO DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y GEOMÉTRICAS Y DESTRUCCIÓN DE LA EXERGIA EN UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN LA CIUDAD DE PORTOVIEJO.

> Trabajo de titulación Previo a la obtención del título de: INGENIERO MECÁNICO

PROFESIONALES EN FORMACIÓN:

VÉLEZ MERA ELINTONG RAÚL ZAMBRANO CASTRO JONATHAN WILMER

Tutor

ING. LENIN PITA CANTOS M.SC.

PORTOVIEJO – MANABÍ – ECUADOR 2017

DEDICATORIA.

A Dios por permitirme alcanzar una meta más de mi vida, brindarme fuerza, temple y bendiciones para llegar a donde estoy hoy.

A mis padres Sr. Elintong Vélez Rodríguez y Rosa Mera Zambrano, a mis hermanas Maryuri y Josselyn y demás familiares que contribuyeron de una u otra forma a conseguir este gran objetivo.

A nuestro amigos y compañeros de la Carrera de Mecánica, por los momentos y vivencias compartidas.

Elintong Raúl Vélez Mera

El presente trabajo se lo dedico a Dios, que con sus bendiciones me permitió alcanzar uno más de mis objetivos.

A mis padres Sr. Wilmer Zambrano Ferrín y la Sra. Lcda. Yadira Castro Zambrano, que gracias a su apoyo incondicional y sabia guía.

A mis hermanas Viviana, Roció, Magdalena, Anabel, Katiusca y Josselyn, sin su presencia el desarrollo de la vida no fuera igual, y a los demás miembros de mi familia que de una u otra forma contribuyeron para llevar efecto este objetivo.

A mis amigos y compañeros de la Carrera de Mecánica, por todos los bellos momentos compartidos dentro y fuera de las aulas.

Jonathan Wilmer Zambrano Castro

AGRADECIMIENTO.

Antes de todo le agradezco a Dios por permitirme el regalo de la vida y contar con su guía y sus bendiciones una de ella contar con mis padres y su apoyo incondicional hacia mí, su sabia guía me permitió desenvolverme en la vida siempre por el lado del bien. A nuestros docentes de la Carrera de Mecánica por contribuir con sus consejos orientados a diversos aspectos de la vida, al Ing. Lenin Pita por su guía y orientación en este proyecto. Finalmente a agradezco a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron para la consecución de este trabajo.

Elintong Raúl Vélez Mera.

A Dios por su guía celestial y bendiciones desde el comienzo de mi vida, brindarme fuerza para sobreponerme en los momentos difíciles, certeza para tomar decisiones importantes y salud para vivir día a día.

A mis padres por su guía fiel, amor, paciencia y comprensión durante toda esta etapa de mi vida, a mis hermanas que contribuyeron siempre con acciones de afecto y detalles de motivación.

A todos los docentes y estudiantes de la Carrera de Mecánica por formar parte de este proceso y enriquecer mi conocimiento de igual forma un agradecimiento especial al Ing. Lenin Pita por su sabia durante la realización de este trabajo.

Jonathan Wilmer Zambrano Castro

² CERTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Quien suscribe la presente señor Ing. Lenin Pita Cantos, Docente de la Universidad Técnica de Manabí, de la Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Química; en mi calidad de Tutor del trabajo de titulación "ESTUDIO DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y GEOMÉTRICAS Y DESTRUCCIÓN DE LA EXERGIA EN UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN LA CIUDAD DE PORTOVIEJO",

desarrollada por los profesionista: Señor, Zambrano Castro Jonathan, Señor, Vélez Mera Elintong Raúl y en este contexto, tengo a bien extender la presente certificación en base a lo determinado en el Art. 8 del reglamento de titulación en vigencia, habiendo cumplido con los siguientes procesos:

- Se verificó que el trabajo desarrollado por los profesionistas cumple con el diseño metodológico y rigor científico según la modalidad de titulación aprobada.
- Se asesoró oportunamente al estudiante en el desarrollo del trabajo de titulación.
- Presentaron el informe del avance del trabajo de titulación a la Comisión de Titulación Especial de la Facultad.
- Se confirmó la originalidad del trabajo de titulación.
- Se entregó al revisor una certificación de haber concluido el trabajo de titulación.

Cabe mencionar que durante el desarrollo del trabajo de titulación los profesionistas pusieron mucho interés en el desarrollo de cada una de las actividades de acuerdo al cronograma trazado.

Particular que certifico para los fines pertinentes

Ing. Lenin Pita Cantos. M. Sc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICACIÓN DEL REVISOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICACIÓN.

Luego de haber realizado el trabajo de titulación, en la modalidad de investigación y que lleva por tema "ESTUDIO DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y GEOMÉTRICAS Y DESTRUCCIÓN DE LA EXERGIA EN UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN LA CIUDAD DE PORTOVIEJO", desarrollado por los profesionistas: Señor, Zambrano Castro Jonathan Wilmer con cédula Nº 131253350-6 y Señor, Vélez Mera Elintong Raúl con cédula Nº 131252252-4, previo a la obtención del título de INGENIERO MECANICO, bajo la tutoría y control del señor Ing. Lenin Julián Pita Cantos, docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas y cumpliendo con todos los requisitos del nuevo reglamento de la Unidad de Titulación Especial de la Universidad Técnica de Manabí, aprobada por el H. Consejo Universitario, cumplo con informar que en la ejecución del mencionado trabajo de titulación, el autor:

- Han respetado los derechos de autor correspondiente a tener menos del 10 % de similitud con otros documentos existentes en el repositorio.
- Han aplicado correctamente el manual de estilo de la Universidad Andina Simón Bolívar de Ecuador.
- Las conclusiones guardan estrecha relación con los objetivos planteados.
- El trabajo posee suficiente argumentación técnica científica, evidencia en el contenido bibliográfico consultado.
- Mantiene rigor científico en las diferentes etapas de su desarrollo.
- Sin más que informar suscribo este documento NO VINCULANTE para los fines legales pertinentes.

Ing. Luis Felipe Sabando P. M. Sc. REVISOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACION DE DERECHO DE AUTOR.

Quienes firmamos la presente, profesionistas; ZAMBRANO CASTRO JONATHAN WILMER Y VELEZ MERA ELINTONG RAUL, en calidad de autores del trabajo de titulación realizada sobre "ESTUDIO DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y GEOMÉTRICAS Y DESTRUCCIÓN DE LA EXERGIA EN UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN LA CIUDAD DE PORTOVIEJO" hacer uso de todos los contenidos que nos pertenecen o de parte de los que contienen este proyecto, con fines estrictamente académicos o de investigación. Los derechos que como autor nos corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a nuestro favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento. Así mismo las conclusiones y recomendaciones constantes en este texto, son criterios netamente personales y asumo con responsabilidad la descripción de las mismas.

Jonathan Wilmer Zambrano Castro

Elintong Raúl Vélez Mera

RESUMEN.

En la redacción del presente trabajo de titulación se presenta el proceso para realizar el estudio de las variables térmicas y geométricas y destrucción de la exergía en un colector solar placa plana de aire con tiro forzado para optimizar el proceso de secado de granos en la ciudad de Portoviejo.

Inicialmente se llevó a cabo el estudio de la energía solar, sus componentes, historia y campos de aplicación; seguidamente se realizó la revisión de bibliografía referente a colectores solares, componentes, recomendaciones constructivas y cálculos matemáticos, para luego ejecutar el dimensionamiento del colector; para el diseño se tomaron en cuenta las variables geométricas, diferentes alternativas de materiales como: estructura del colector, placa absorbedora, cubierta y aislamiento.

Una vez ya definido los parámetros constructivos, se realizó el ensamblaje de los componentes, estableciendo la esbeltez del colector de 2 a 1, espesor de aislante inferior de 5 cm y laterales de 2,5 cm, basados en estudios anteriores, los cuales establecen alturas placa absorbedora – cubierta, comprendidas entre 5 - 7,5 - 10 cm. Para la selección de la placa absorbedora se tomaron aspectos económicos y de rendimiento, como resultado se utilizó plancha galvanizada de 1/16" recubierta con pintura negro mate.

Posteriormente, se procedió a la toma de datos experimentales en las instalaciones del Taller de soldadura de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para su efecto se utilizaron los dispositivos como anemómetro, termómetro digital, y cámara térmica; durante el proceso de obtención de datos se manipularon las variables térmicas con el objetivo de determinar su comportamiento a diferentes condiciones de trabajo.

Finalmente el cálculo exergético del colector solar de placa plana, a través del cual se estableció que: la destrucción de exergía que se da en el colector solarse encuentra en la transferencia de energía al fluido, la captación de energía de la placa absorbedora, exergía ganada por el fluido a través absorbedor. El resultado del estudio exergético del colector solar de placa plana permite establecer parámetros constructivos, representar de forma gráfica el comportamiento de las irreversibilidades y los modelos matemáticos de la destrucción de la exergía en función de las variables térmicas y geométricas.

Palabras Clave:

Energía Solar, Destrucción de Exergía, Cálculo Exergético y Esbeltez

SUMARRY

In the writing of the present work of titling the process for the study of the thermal and geometric variables and destruction of the exergy in a solar collector flat plate of air with forced draft is presented to optimize the process of drying of grains in the city of Portoviejo.

Initially the study of the solar energy, its components, history and fields of application was carried out; The literature review on solar collectors, components, construction recommendations and mathematical calculations was then carried out and then the collector sizing was carried out. For the design were taken into account the geometric variables, different materials alternatives such as: structure of the collector, absorber plate, cover and insulation.

Once the construction parameters were defined, the components were assembled, establishing the slenderness of the collector from 2 to 1, thickness of lower insulation of 5 cm and sides of 2.5 cm, based on previous studies, which establish heights Absorber-cover plate, comprised between 5 - 7.5 - 10 cm. For the selection of the absorber plate, economic and performance aspects were taken, resulting in a 1/16 "galvanized sheet coated with matt black paint.

Subsequently, the experimental data were taken at the welding workshop of the School of Mechanical Engineering, for which the devices were used as an anemometer, digital thermometer, and thermal camera; During the process of obtaining data, the thermal variables were manipulated in order to determine their behavior to different working conditions.

Finally the exergetic calculation of the flat plate solar collector, through which it was established that: the destruction of exergy that occurs in the solar collector is found in the transfer of energy to the fluid, the energy uptake of the absorber plate, exergy gained By the fluid through the absorber. The result of the exergetic study of the flat plate solar collector allows to establish constructive parameters, graphically represent the behavior of the irreversibilities and the mathematical models of the destruction of the exergy as a function of the thermal and geometric variables.

Keywords:

Solar Energy, Exergy Destruction, Exergetic Calculation and Slenderness

Contenido

Dedicatoria	II
Agradecimiento	III
Certificación del trabajo de titulación	IV
CERTIFICACIÓN DEL REVISOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERT	IFICACIÓN.
	V
DECLARACION DE DERECHO DE AUTOR	VI
Resumen	VII
Sumarry	VIII
CAPITULO I	1
1. TEMA	1
1.1. Marco de Localización	1
1.1.1. Macro Localización	1
1.1.2. Micro Localización	2
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	5
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.4.1. Descripción de la Problemática	5
1.4.2. Problema	6
1.5. HIPÓTESIS	6
1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	7
1.6.1. Variable Independiente. Secado de granos	7
1.6.2. Variable Dependiente. Destrucción de la Exergía	8
1.7. VISUALIZACIÓN DEL ALCANCE DEL ESTUDIO	9
1.7.1. Aporte Social	9
1.7.2. Aporte Económico	9
1.7.3. Aporte Científico	10

1.8. OBJETIVOS1	0
1.8.1. Objetivo general	0
1.8.2. Objetivos Específicos1	0
1.8.3. Campos de Acción1	1
CAPITULO II	2
2.1. ENERGÍA SOLAR1	2
2.1.1. Tipos de energía solar1	2
2.1.2. Balance térmico y cantidades proporcionales de radiación solar	4
2.1.3. Variación espectral de la radiación solar1	6
2.1.4. Variaciones temporales (estacionales y diarias) de la radiación solar1	7
2.1.5. Intensidad de la radiación solar sobre la superficie1	9
2.2. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA Y DIFUSA2	20
2.2.1. Componentes de la Radiación Solar2	20
2.3. RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR2	22
2.3.1.Mapa solar anual del Ecuador2	24
2.4. EXERGÍA DE LA RADIACIÓN SOLAR2	24
2.4.1. Exergía por Transferencia de Calor2	26
2.4.2. Modelo Exergético de la Radiación Solar2	26
2.5. USOS DE LA ENERGÍA SOLAR2	27
2.5.1. Energía solar para hogares2	27
2.5.2. Aplicaciones en el sector industrial2	28
CAPITULO III2	29
3. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y GEOMETRICAS DE UN COLECTO SOLAR DE AIRE DE PLACA PLANA2	R 29
3.1. COLECTORES SOLARES DE AIRE DE PLACA PLANA DE TIRO FORZADO2	29
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL COLECTOR SOLAR3	32
3.2.1. Cubierta	33

3.2.2. Placa Absorbente.	
3.2.3. Aislamiento	
3.2.3.1. Revestimiento del Absorbedor	
3.3.4. Carcaza.	
3.3.5. Circulación forzada del colector solar de aire.	40
3.3. VARIABLES TÉRMICAS DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE	42
3.3.1. Coeficiente de Convección del Aire	43
3.3.2. Número de Reynolds en colectores solares de placa plana.	47
3.3.3. Número de Reynolds en ductos cuadrados	48
3.3.4. Densidad y Viscosidad del Aire.	49
3.3.5. Velocidad en el colector solar de placa plana	50
3.3.6. Flujo de Masa de Aire.	51
3.4. VARIABLES GEOMÉTRICAS DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE.	51
3.4.1. Esbeltez del Colector.	52
3.4.2. Inclinación del colector solar	53
3.4.3. Altura del colector	53
3.4.4. Ductos de entrada y salida del colector	54
3.5. BALANCE ENERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLAN	A TIRO
FORZADO	54
3.5.1. Calor incidente en la Placa	55
3.5.2. Calor Transmitido de la Placa Absorbedora al Fluido	56
3.5.3. Factor de remoción de calor.	56
3.5.4. Coeficiente global de transferencia de calor	57
3.5.5. Eficiencia energética del colector solar.	60
3.5.6. Recta de normalización.	60
3.6. BALANCE EXERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLAN	A62
3.6.1. Destrucción de exergía del colector solar de placa plana	64

CAPITULO IV	67
4. DESARROLLO DEL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	67
4.1. Descripción de las variables a considerar en la toma de datos del colector	67
4.1.1. Instrumentos de Medida.	68
4.1.2. Descripción de las mediciones.	73
4.1.3. Procesamiento estadístico de los resultados.	77
4.2. BALANCE ENERGÉTICO DEL COLECTOR SOLAR	78
4.2.1. Calor incidente en la Placa Absorbedora	78
4.2.2. Cálculo del coeficiente de pérdidas.	80
4.3. BALANCE EXERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA	83
4.3.1. Exergía del Fluido de Trabajo	83
4.3.2. Incremento de flujo de exergía en el fluido	84
4.3.3. Tasa de Exergía de la Radiación solar Incidente	84
4.3.4 Exergía absorbida por la placa de absorción del colector solar plano	85
4.3.5. Destrucción de exergía del colector solar de placa plana	85
4.3.6. Pérdida de calor hacia los alrededores del colector	85
4.3.7. Destrucción de la exergía debido a las pérdidas de calor del colector	86
4.3.8. Exergía Transferida de la placa absorbedora al fluido	86
4.3.9. Exergía destruida en el proceso de transferencia de calor entre la placa absorbedora y el fluido.	87
4.3.10. Eficiencia exergética del colector solar.	87
4.3.11. Análisis de los Resultados	90
4.3.11.1. Incremento de Exergía del fluido VS Rendimiento energético4.3.11.2. Rendimiento exergético vs temperatura ambiente	90 91
4.3.11.3. Exergía perdida hacia los alrededores VS Temperatura promedio de la	
placa	92

4.3.11.4. Exergía destruida por transferencia de calor de placa- fluido VS temperatur aparente de la placa9	:a)3
4.3.11.5. Exergía destruida por la temperatura aparente del sol-placa VS temperatura promedio de la placa	a 94
4.3.11.6. Temperatura de salida del aire VS Flujo másico	95
4.3.11.7. Rendimiento exergético VS Flujo másico	96
4.3.11.8. Incremento de exergía del fluido VS Flujo másico	97
4.3.11.9. Incremento de exergía del fluido VS Temperatura ambiente	98
4.3.11.10. Radiación incidente VS Rendimiento Exergético	99
4.3.11.11. Radiación VS Temperatura de salida10	00
4.4. VERIFICACIÓN DE OBJETIVOS ESPECÍFICOS10	01
4.4.1. Verificación del objetivo específico uno10	01
4.4.2. Verificación del objetivo específico dos10	01
4.4.3. Verificación del objetivo específico tres10	01
4.4.4. Verificación del objetivo específico cuatro10	02
4.5. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENE EN EL	
RENDIMIENTO10	02
4.6. RESULTADOS ALCANZADOS10	03
4.7. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES10	04
4.7.1. Conclusiones10	04
4.7.2. Recomendaciones	06
BIBLIOGRAFÍA	10
ANEXOS	13

CAPITULO I.

1. TEMA.

Estudio de las variables térmicas y geométricas y destrucción de la exergía en un colector solar placa plana de aire con tiro forzado para optimizar el proceso de secado de granos en la ciudad de Portoviejo.

1.1. MARCO DE LOCALIZACIÓN.

1.1.1. Macro Localización.

El presente proyecto se ejecutará dentro del territorio Ecuatoriano, en la provincia de Manabí, cantón Portoviejo, Sector de la Av. Urbina.



Figura 1.1 Macro Localización Fuente: Google Map

1.1.2. Micro Localización.

El espacio donde se procederá a realizar el trabajo, es en el área de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas.



Figura 1.2 Macro Localización Fuente: Google Map

1.2. ANTECEDENTES.

El sol es la estrella que por su masa gravitacional domina el sistema universal, incluyendo a la Tierra, aporta de manera directa o de forma indirecta la radiación de su energía electromagnética, la cual mantiene la vida en nuestro planeta, ya que todo el alimento y todo el combustible tienen su procedencia de plantas que hacen uso de la energía solar.

La energía radiante proveniente de la estrella dominante llega a la tierra por medio del espacio en forma de ondas que interactúan con la atmosfera y la superficie de la misma.

En la antigua Roma fueron los primeros en utilizar vidrio en las ventanas con el objetivo de atrapar la luz del sol en sus viviendas, además los romanos fueron los primeros construyendo viviendas hechas de cristal que se conocen como invernaderos las cuales eran de uso específico para el crecimiento y desarrollo de plastas exóticas que eran traídas desde otros lugares fuera de imperio.

Arquímedes hizo uso de espejos cóncavos para incendiar durante el renacimiento las naves romanas, basado en esta idea en el año de 1601 Kicher encendió a distancia una pila de madera.

Más tarde en el año de 1707 George Louis confeccionó un horno de sol que estaba formado por 360 espejos con un solo foco, este lo utilizo para hacer una demostración en los jardines de Versalles donde encendió leña a 60 metros de distancia.

El suizo Nicholas de Saussure en el año de 1740 fabricó el primer colector solar de placa plana el cual estaba formado por una cubierta de vidrio y una placa de metal color negra contenida en una caja con el correspondiente aislamiento térmico. Este colector solar plano se usó para cocer alimentos que se introducían en el interior del equipo.

El uso y desarrollo constantemente de la energía solar duró hasta 1970. Pero luego en aquellos años el precio del petróleo y el gas aumento lo cual llevo a resurgir el uso de energía

solar para los diversos fines en sus labores como la generación de energía eléctrica, calentamiento de agua, secado de productos, etc.

La energía del sol es utilizada esencialmente de dos formas. La primera es la fototermica, donde esta energía del sol se usa para el calentamiento de fluido y la segunda forma es la fotovoltaica en donde la energía eléctrica es producto directamente del sol.

Con el advenimiento de programas informáticos surgieron incontables aplicaciones y con ello, una cantidad mayor en demanda de problemas teóricos y prácticos.

En muchas ocasiones la realidad es bastante compleja como para ser estudiada directamente y es preferible hacer uso de la simulación digital a través de la formulación de modelos teóricos que contenga las variables más relevantes que aparezcan en el fenómeno en estudio y las relaciones más importantes entre ella.

Se considera que la simulación nace en 1777 con el planteamiento del problema "la aguja de buffon", un método matemático sencillo para ir aproximando el valor del número π a partir de sucesivos intentos.

A medida del año 1946 con la aparición de los primeros ordenadores se registraron bases para la fulminante evolución del campo de la simulación seguidamente con la creación de microprocesadores inteligentes y variedades de controladores esta se ha convertido en algo indispensable para el mundo real.

En la actualidad gracias al mundo digital es posible aplicar la simulación de modelos teóricos a través de softwares que permiten conocer la realidad, concreta o posible, que está a nuestro alrededor, esta parte de un sistema netamente real y lo convierte en patrones o formulas en que los resultados no varían mucho de la realidad.

Partiendo desde los primeros usos de energía solar es posible aplicar los diversos softwares de simulación para estudiar mejor el funcionamiento de procesos y realizar mejoras en dispositivos como por ejemplo en colectores solares de placa plana donde este aprovecha la energía solar donde a través de procesos termodinámicos y de transferencia de calor se genera la entalpía que es una propiedad que permite establecer la cantidad de calor necesario para evaporar una determinada proporción de agua contenida en el producto a secar.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

La finalidad de esta investigación es determinar las irreversibilidades presentes durante el proceso de transferencia de calor en los colectores solares; para esto debemos de calcular y analizar detenidamente las variables térmicas y geométricas presentes la máquina, y cada proceso de transmisión de energía presente en estos equipos.

En la actualidad la optimización de los procesos en la industria demanda un estudio muy profundo, dejando atrás los cálculos superficiales y entrando más al campo de esta rama de ma física que en los últimos tiempos ha adquirido un reconocimiento vital en la optimización de procesos, el análisis exergético se muestra como el camino para determinar las condiciones de irreversibilidad de los procesos atendiendo a determinar en qué parte del evento llevado acabo se produce el aumento considerable de la entropía que a su vez conlleva a la generación de la destrucción de la exergía.

El desarrollo del proyecto posee una factibilidad considerable ya que al reducir el tiempo de secado y aumenta la calidad del mismo, dicho de otra manera a través del análisis de las irreversibilidades y estudio de las variables térmicas y geométricas podremos establecer condiciones que mejoren el rendimiento, asegurando el beneficio social del proyecto al aportar de manera considerable al proceso de secado.

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.4.1. Descripción de la Problemática.

Los habitantes y medianas empresas inmersos en la actividad agrícola del cantón de Portoviejo que de cierta manera trabajan con el secado de algunos granos, se encuentran con muchas desventajas ya que los realizan de forma convencional. Se encuentran muchos inconvenientes como el hurto de los producto, sin la óptima energía del sol no pueden realizar el secado, mucho tiempo en el secado de granos, productos que pierden sus propiedades nutritivas.

Con el estudio de las variables térmicas y geométricas del calentador solar de placa plana se logra mitigar muchas desventajas en el secado convencional y nos permite el perfeccionamiento en el secado de granos.

1.4.2. Problema.

¿El Estudio de las variables térmicas y geométricas de un calentador solar de placa plana de tiro forzado reduce las irreversibilidades y mejora la eficiencia de los colectores solares para que su aplicación sea más accesible al sector agrícola?

Espacial.

La presente investigación se desarrollará en las Instalaciones de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí, específicamente en el área de Taller.

Temporal.

Para el desarrollo de la investigación se considerará información existente hasta la presente fecha, durante el periodo de junio 2015 hasta septiembre del 2016.

1.5. HIPÓTESIS.

El estudio de la destrucción de la exergía en un colector solar de placa plana para el secado de grano ayudará a disminuir las irreversibilidades y mejorara el rendimiento del proceso de secado de grano en la cuidad de Portoviejo, garantizando el secado con mayor calidad y eficiencia.

1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.

1.6.1. Variable Independiente. Secado de granos.

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍA	INDICADORES	ITEMS	TÉCNICA/ ESTUDIO
El secado es un	Consideracion	Nivel de	¿Cree	-Encuestas a los
proceso de gran	es para el	productivo	usted que el	funcionarios de
importancia en la	secado del	Nivel de	incremento	agro calidad
cadena de producción	producto.	servicio	de la	-Entrevistas a
de alimentos, ya que el	-Contenido de		eficiencia	agricultores que
contenido de humedad	humedad de los		energética	ya están
es, sin duda, la	granos		de los	utilizando
característica más	I have a da d		calentadores	calentadores
importante para	relativa.		solares	solares.
determinar si el grano			ayuda a	-Observación de
corre el riesgo de			disminuir el	datos de
deteriorarse durante el			tiempo de	productiva del
almacenamiento. El			secado de	secado de
secado se realiza para			granos en	granos.
inhibir la germinación			Portoviejo?	
de las semillas, reducir				
el contenido de				
humedad de los granos				
hasta un nivel que				
impida el crecimiento				
de los hongos, y evitar				
las reacciones de				
deterioración				

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍA	INDICADORES	ITEMS	TÉCNICA/ESTUDIO	
Las irreversibilidades	-Primera ley	-Estado de los	¿Cree	-Encuestas a	
como la como la	de la	productos.	usted que el	Ingenieros	
fricción, el mezclado,	Termodinámi	-Control en el	estudio de	Mecánicos	
las reacciones	ca.	secado.	las	-Encuestas a	
químicas, la	-La segunda	-Producción en	irreversibi-	agricultores	
transferencia de calor	ley de la	todas épocas	lidades está	-Entrevistas	
debida a una	termodinámic	del año.	involucrado	-Observación	
diferencia de	a.		en el diseño		
temperatura, la			de un		
expansión libre o la	-Principio de		calentador		
condensación sin	disminución		solar?		
cuasiequilibrio	-Modelos		-Si		
siempre generan	exergéticos.				
entropía y cualquier			-No		
cosa que genere					
entropía siempre va a					
destruir exergía. Por					
lo tanto la exergía					
destruida es					
proporcional a la					
entropía generada.					

1.6.2. Variable Dependiente. Destrucción de la Exergía.

1.7. VISUALIZACIÓN DEL ALCANCE DEL ESTUDIO.

El presente estudio de variables térmicas y geométricas de un colector solar de placa plana de tiro forzado en las instalaciones del Taller de Mecánica de la Escuela de Mecánica de la U.T.M., se involucra al personal docente, estudiantil de la escuela de Mecánica y comunidad inmersa en la actividad agraria del cantón.

1.7.1. Aporte Social.

El desarrollo de proyectos de investigación direccionados a la temática de la exergía cada vez toma más fuerza debido a la relación que tiene esta para con el aumento de la eficiencia de los equipos en los cuales se lleven a cabo procesos de transferencia de calor. El desarrollo de la investigación brindara las pautas para futuras investigaciones de ésta temática.

El estudio exergético de los colectores solares de placa plana permite obtener las irreversibilidades que desarrollan en el mismo en cual pueden ser analizadas y determinar pautas para mejor la eficiencia el equipo.

El aporte social que brinda esta investigación es hacer conocer a la comunidad que el secado de grano se lo puede realizar mediantes colectores solares que no brinda un producto libre de impureza y menor tiempo de secado lo significa un ahorro económico.

1.7.2. Aporte Económico.

Cuando hablamos de economía en la industria siempre se relaciona con el tiempo, variable independiente de nuestra vida, por lo cual la finalidad del proyecto se enfoca en la optimización del proceso de transferencia de calor hacia el fluido activo mediante la determinación de las irreversibilidades o aumento de la entropía, presentes durante el proceso para reducir los tiempos de secado, con la consecuencia del ahorro energético y económico.

1.7.3. Aporte Científico

Los conocimientos adquiridos durante el proceso enseñanza – aprendizaje y de formación profesional en la carrera, han permitido la elaboración de este proyecto, a fin de facilitar y realizar los diferentes ensayos, pruebas y análisis termo-gráficos para establecer un escenario con información técnica y respaldada, en la actualidad es poco el material científico de acerca de la destrucción de la exergía durante procesos de transferencias de calor, a más de lo mencionado anteriormente se establecerán condiciones idóneas para la construcción de colectores solares de placa plana, mismos que serán una alternativa viable para los agricultores de nuestro país, llevando su producto a otro nivel al tecnificar de manera sostenible su producción dejando atrás la contaminación generada por las cámaras de secado que utilizan combustibles fósiles.

1.8. OBJETIVOS.

1.8.1. Objetivo general.

Realizar el estudio de las variables térmicas y geométricas y la destrucción de la exergía de un calentador solar placa plana de aire con tiro forzado para mejorar el rendimiento energético en el secado de granos en la ciudad de Portoviejo.

1.8.2. Objetivos Específicos.

- Identificar las variables térmicas y geométricas que gobiernan la transferencia de calor en el colector solar.
- ✓ Diseñar los componentes del calentador solar de placa plana de tiro forado.
- Determinar las irreversibilidades y destrucción de la exergía en el colector solar de placa plana de tiro forzado.
- ✓ Determinar el rendimiento energético y exergético del colector solar de aire.

1.8.3. Campos de Acción.

La Universidad Técnica de Manabí ofrece a la colectividad manabita y ecuatoriana en su Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, cinco escuelas de Ingenierías entre las cuales se encuentra la Escuela de Mecánica, la misma que a través de la investigación científica aporta de manera considerable al desarrollo industrial del cantón y la provincia. Atendiendo a las necesidades de tecnificación del agro y aprovechando el potencial energético que nos brinda la energía solar, se busca desarrollar a este sector productivo mediante la alternativa de implementar secadores solares de placa plana de tiro forzado centrándonos en la reducción de las irreversibilidades durante los procesos operativos para mejorar su eficiencia.

Mediante la toma de datos con la ayuda de termo-cámaras, anemómetro multifuncional, programas de cálculo y software de simulación estableceremos las condiciones de trabajo de cada uno de los elementos del colector solar durante su periodo de trabajo, con el fin de plantear las alternativas térmicas y geométricas de las variables (esbeltez) y la destrucción de la exergía o energía útil de trabajo durante este.

CAPITULO II.

2.1. ENERGÍA SOLAR.

El Sol es nuestra principal fuente de energía. La energía que proviene de él, llamada energía solar, llega a nosotros en la forma de ondas electromagnéticas después de experimentar considerables interacciones con la atmósfera. La energía de radiación emitida o reflejada por los constituyentes de la atmósfera forma la radiación atmosférica.

Al ser el sol una masa formada por gases y a su vez con átomos interactuando nuclearmente produce una cantidad de calor estimada en 3.86×10^{23} kW.

El Sol es un cuerpo negro que radia energía térmica con una temperatura alrededor de 5780 °K.

La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

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

2.1.1. Tipos de energía solar.

La humanidad desde sus inicios tiene una profunda relación con el sol, desde tomarlo como una divinidad hasta la actualidad considerada como la energía limpia con mayor potencial aprovechable, se presentan tres tipos de energía solar:

Energía solar fotovoltaica: Se refiere a la electricidad producida por la transformación de una parte de la radiación solar con una célula fotoeléctrica (es un componente electrónico

que, expuesto a la luz (fotones), genera una tensión). Varias celdas están conectadas entre sí en un módulo solar fotovoltaico. Y, después, varios módulos se agrupan para formar un sistema solar para uso individual o una planta de energía solar fotovoltaica, que suministra una red de distribución eléctrica. El término "fotovoltaica" se refiere al fenómeno físico – el efecto fotovoltaico – o bien a la tecnología asociada.

Energía solar térmica: Consiste en utilizar el calor de la radiación solar. Se presenta en diferentes formas: centrales solares termodinámicas, agua caliente y calefacción, refrigeración solar, cocinas y secadores solares. La energía solar termodinámica es una técnica que utiliza energía solar térmica para generar electricidad.

Energía solar pasiva: El uso más antiguo de la energía solar consiste en beneficiarse del aporte directo de la radiación solar y es la llamada energía solar pasiva. Para que un edificio se beneficie con muy buena radiación solar, se debe tener en cuenta la energía solar en el diseño arquitectónico: fachadas dobles, orientación hacia el sur y superficies vidriadas, entre otros. El aislamiento térmico desempeña un papel importante para optimizar la proporción del aporte solar pasivo en calefacción y en la iluminación de un edificio. Una casa o un edificio que posean energía solar pasiva estarán contribuyendo a un importante ahorro energético. (Esther, 2016)

Otros aspectos en los cuales se puede implementar un sistema de captación de energía solar son: cargadores de baterías, ventiladores, lámparas de jardín, bombas hidráulicas, entre otros.

La energía solar que llega a la atmósfera terrestre se llama irradiación solar total cuyo valor obtenido en estudios es el siguiente:

$$G_s = 1370 W/m^2$$

Esta irradiación también se la denomina como constante solar y la cual representa la tasa a la cual la energía solar incide sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol en el borde exterior de la atmósfera, cuando la Tierra se encuentra a su distancia media del Sol. (Cengel, Transferecia de Calor y Masa, 2010).

La energía solar que incide sobre una superficie de la Tierra se considera que consta de partes directa y difusa. La parte de la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se llama radiación solar directa G_p . Se supone que la radiación dispersada llega a la superficie terrestre de manera uniforme desde todas direcciones y se llama radiación solar difusa G_d . Entonces, la energía solar total que incide sobre la unidad de área de una superficie horizontal sobre el piso es:



Figura 2.1.Representación gráfica de la incidencia de la radiación sobre la superficie terrestre. Fuente: (Cengel, Transferecia de Calor y Masa, 2010).

2.1.2. Balance térmico y cantidades proporcionales de radiación solar.

En términos generales y en el largo plazo, el intercambio de energía entre el Sol y la Tierra presenta un estado de balance térmico, lo cual quiere decir que las cantidades globales de energía que ésta última recibe tienden a ser equivalentes a las que emite. Si ese balance térmico se rompiera, dando lugar a un desequilibrio prolongado, la Tierra se enfriaría o calentaría paulatinamente hasta volverse inhabitable (de hecho es lo que muchos científicos asumen que está sucediendo actualmente, aunque de manera relativamente moderada, dando lugar a fenómenos como el calentamiento global). La parte superior de la atmósfera recibe una cantidad de energía solar equivalente a la constante solar. Sin embargo, debido a que en un momento dado solo la mitad de la esfera terrestre se encuentra expuesta a la radiación solar, ese valor suele dividirse entre 4 para obtener una radiación incidente promedio de 342 W/m2. Esa energía se distribuye de la siguiente manera, también en valores promedio:

- 77 W/m2 (22%) es reflejada de nuevo al espacio por la atmósfera.
- 67 W/m2 (20%) es absorbida por la atmósfera.
- 198 W/m2 (58%) atraviesa la atmósfera y llega a la superficie terrestre, aproximadamente la mitad como radiación difusa (por efecto de la misma atmósfera) y la otra mitad como radiación directa (que atraviesa la atmósfera prácticamente sin interferencia).

Se considera que de los 198 W/m2 que llegan a la superficie terrestre, tanto en forma de radiación difusa como directa, 30 W/m2 (9%) son reflejados y 168 W/m2 (49%) son absorbidos por la misma. Con estos últimos datos podemos completar el balance térmico global, que se expresaría con la siguiente expresión: (Sol-Arq, 2015)

$$I_{ins} - I_{rfl} - I_{ab} - I_{sup} - I_{ab-ter} = 0 (EC.2.1)$$

Donde:

 $I_{ins} = 342 \text{ W/m2} \text{ (radiación incidente)}$

 $I_{rfl} = 77 \text{ W/m2}$ (radiación reflejada por la atmósfera)

 I_{ab} =67 W/m2 (radiación absorbida por la atmósfera)

 I_{sup} =30 W/m2 (radiación reflejada por la superficie terrestre)

 $I_{ab-ter} = 168 \text{ W/m2}$ (radiación absorbida por la superficie terrestre)

Esta expresión implica el manejo de promedios globales, lo cual representa una simplificación de los fenómenos involucrados. En realidad estos valores suelen presentar variaciones importantes. Por ejemplo, en las partes de la Tierra cuyo cielo se encuentra cubierto de nubes densas la reflexión hacia el espacio es mayor al 22%. Así mismo, la radiación reflejada por la superficie terrestre (sin contar los océanos) varía en gran medida dependiendo de sus características particulares: las superficies con vegetación profusa solo reflejan entre el 5% y el 10% de la radiación recibida, las superficies con pasto entre el 15% y el 25%, las zonas arenosas (como los desiertos) entre el 35% y el 45%, y las superficies cubiertas de nieve reciente hasta el 95%. (Sol-Arq, 2015)

Existen otros fenómenos interesantes relacionados con el intercambio de energía radiante de la Tierra. Por ejemplo, las superficies construidas de las zonas urbanas también reflejan la radiación solar en diversas proporciones, aunque generalmente es más la radiación absorbida, lo cual da lugar a lo que se conoce como islas de calor. Por otro lado, la superficie terrestre tiende a re irradiar buena parte de su energía durante la noche, lo cual sucede de manera más eficiente cuando el cielo se encuentra despejado. Esa es la razón por la que en algunos lugares las madrugadas suelen ser más frías cuando el cielo se encuentra despejado.

2.1.3. Variación espectral de la radiación solar.

La radiación electromagnética proveniente del sol se distribuye en un amplio rango de frecuencias. La radiación ultravioleta (UV) representa apenas un 8-9% del total de la energía contenida por la insolación. El rango visible representa el 46-47% del total de la energía recibida del sol. Casi la totalidad del restante 45% se encuentra en rangos cercanos al infrarrojo.

Existen diferencias significativas entre la distribución espectral de la radiación que incide sobre la parte exterior de la atmósfera y la distribución espectral de la radiación que llega a la superficie terrestre. Esto es debido principalmente a que las moléculas de gas y las partículas suspendidas absorben una parte de la radiación y retienen una fracción de energía en forma de calor, provocando atenuaciones significativas en la intensidad de la radiación solar. (Sol-Arq, 2015)

Los rayos X y otras radiaciones de onda muy corta del espectro solar son absorbidos en gran medida en la ionosfera por el nitrógeno, el oxígeno y otros componentes atmosféricos. La mayor parte de los rayos ultravioleta, por su parte, son absorbidos por el ozono. Para longitudes de onda superiores a 2,5 μ m se produce una fuerte absorción debida al dióxido de carbono y al agua presentes en la atmósfera, por lo que llega muy poca radiación de este tipo hasta la superficie terrestre. En lo que respecta a las aplicaciones terrestres de la energía solar, las radiaciones más importantes tienen longitudes de onda comprendidas entre 0,29 μ m y 2,5 μ m. Estas radiaciones también son las que más variaciones sufren debido a la difusión y la absorción. (Sol-Arq, 2015)

2.1.4. Variaciones temporales (estacionales y diarias) de la radiación solar.

La inclinación constante del eje norte-sur de la Tierra durante el movimiento de traslación que ésta hace alrededor del sol provoca que los rayos solares incidan con diferentes ángulos sobre un punto determinado de la superficie terrestre a lo largo del año. Es decir, para un mismo sitio los recorridos aparentes del sol tendrán variaciones estacionales importantes durante el ciclo anual. Así, durante el mes de junio el hemisferio norte del planeta se inclina hacia el sol, con lo que no sólo se acerca él (lo cual en realidad tiene un efecto reducido), sino que recibe los rayos del sol en forma más directa, es decir, atravesando una porción menor de la atmósfera. Durante ese mismo mes, en el hemisferio sur sucede lo contrario: al alejarse del sol la radiación incide sobre la atmósfera con ángulos más bajos y por lo tanto atraviesan una mayor porción de ésta antes de llegar a la superficie. En términos simples, esto explica las diferencias en las tasas de incidencia de la radiación solar que hacen que el hemisferio norte se encuentre en verano mientras que el hemisferio sur se encuentra en invierno. Obviamente en las latitudes elevadas, tanto hacia el norte como hacia el sur, este efecto se siente de manera más intensa, mientras que en la franja ecuatorial las variaciones anuales en la incidencia de la radiación solar no son tan importantes.

En los ciclos diarios generados por el movimiento de rotación que la tierra efectúa sobre su propio eje sucede un fenómeno similar. Durante el amanecer y el atardecer, en un punto determinado de la superficie terrestre los rayos solares inciden con ángulos muy bajos y atraviesan una porción mayor de la atmósfera. Nuevamente, esto provoca una disminución importante de la intensidad de la radiación solar, hasta el punto de que es posible ver directamente al sol. Justo hacia el mediodía sucede lo contrario: el sol se encuentra en su posición más elevada posible, de acuerdo a la latitud del sitio y la fecha del año, y atraviesa una porción menor de la atmósfera terrestre antes de incidir sobre ella. La radiación solar se intensifica entonces de manera importante.

Este fenómeno se relaciona estrechamente con las oscilaciones diarias de la temperatura, aunque estas no se corresponden exactamente con los momentos de máxima y mínima radiación, debido al efecto de masa térmica (acumulación de calor) de la superficie terrestre. Así, las temperaturas mínimas suelen darse hacia las 5:00-7:00 AM, justo antes de la salida del sol, mientras que las máximas se dan generalmente hacia las 2:00-4:00 PM.

Los índices de nubosidad también juegan un papel importante en la cantidad de radiación solar que llega a la tierra. Un cielo nublado reduce significativamente la radiación solar directa y, si bien al mismo tiempo puede incrementar ligeramente la difusa, el balance final es una reducción de la radiación global que llega hasta nosotros. Este fenómeno puede afectar las variaciones estacionales explicadas arriba, ya sea enfatizándolas o matizándolas, dependiendo de las temporadas en que se presenten mayores índices de nubosidad.

2.1.5. Intensidad de la radiación solar sobre la superficie.

Existe otro fenómeno que afecta la intensidad de la radiación solar sobre un lugar determinado. También se relaciona con el ángulo de incidencia, pero en este caso no por la porción de atmósfera que los rayos solares deben atravesar, sino por la distribución de estos sobre las superficies en las que se proyectan.

Para visualizar este fenómeno se considera la radiación solar como un paquete de rayos, los cuales debido al tamaño relativo del sol respecto a la tierra se puede considerar paralelos y equidistantes entre sí. Cuando ese paquete de rayos incide sobre una superficie perpendicular a su dirección, su "densidad de incidencia" es la máxima posible (mayor número de rayos por unidad de área). Conforme el ángulo de incidencia de los rayos solares se reduce (menos de 90°), el mismo paquete de rayos se distribuye en una mayor superficie, es decir, disminuye la densidad de incidencia (menor número de rayos por unidad de superficie).

Esta variación de la intensidad de la radiación solar puede entenderse a gran escala, por ejemplo considerando la superficie terrestre de manera global, pero también puede considerarse en relación con superficies relativamente pequeñas, como los planos conformados por los cerramientos de los edificios. De especial interés resultan las cubiertas, que suelen ser las superficies más afectadas por la radiación solar. En algunos sistemas arquitectónicos de climas extremadamente cálidos y áridos, las cubiertas de tierra abovedadas han demostrado una cierta capacidad para disminuir el efecto de la radiación solar, entre otras cosas porque su geometría permite sacar provecho del fenómeno descrito líneas arriba. (Sol-Arq, 2015)

2.2. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA Y DIFUSA.

La energía solar H que recibe la superficie de la tierra durante un día le llega como componente solar directa HD, cuando proviene de los rayos directos del sol, y como componente difusa Hd cuando procede de la energía difundida por el resto de la bóveda celeste, verificándose:

$$H_{rec} = H_{Dr} + H_{df} \qquad \left[\frac{W}{m^2} dia\right] \qquad (EC.2.2)$$

De donde:

 $H_{rec} = Energía Solar recibida.$ $H_{Dr} = Radiación solar directa$ $H_{df} = Radiación solar difusa$

2.2.1. Componentes de la Radiación Solar

2.2.1.1. Radiación solar difusa

Una parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación, llamada difusa, va en todas direcciones, efecto producido por las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.

2.2.1.2. Radiación solar directa

Es la radiación que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

2.2.1.3. Radiación solar reflejada

Este tipo de radiación solar es la que refleja la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

2.2.1.4. Radiación solar global

La radiación solar global es la radiación total. Esta constituye la suma de las tres radiaciones anteriormente nombradas.

En un día despejado, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado no hay radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es difusa. (Construmatica, 2011)

La nubosidad influye notablemente en la proporción de las componentes directa y difusa, ya que hay que considerar que para días totalmente cubiertos la única radiación que llega a la tierra será difusa. Es por ello que diversos autores han desarrollado modelos para determinar la proporción de energía difusa en función del índice de insolación Kt:

$$\frac{H_d}{H} = f(K_t) = f\left(\frac{H}{H_0}\right) \tag{EC.2.3}$$

Donde:

Ho = Radiación solar fuera de la atmosfera

Kt = Indice de Insolación.

El coeficiente Kt nunca tomará valores extremos (ni próximos a 0 ni a 1), salvo en el caso de grandes altitudes en que Kt puede tener valores muy altos al aumentar la transparencia de la atmósfera. Existen numerosos modelos para la estimación de la radiación difusa media mensual en relación con la total en función del Kt medio mensual, como la estimada por Page aunque dicho modelo se considera demasiado simple:

$$\overline{K_t} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_0}} \to \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1.00 - 1.13 \,\overline{Kt}$$
(EC.2.4)

El modelo propuesto por Liu-Jordan es el más aceptado, aunque en el momento de su determinación se considera a la constante solar Ies=1394 $[W/m^2]$ en vez del valor actualmente reconocida de Ies = 1370 $[W/m^2]$.

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1.39 - 4.027\overline{K_t} + 5.531\overline{K}t^2 - 3.1108\overline{K}t^3$$
(EC.2.5)

El modelo propuesto por Collares y Rabl es interesante porque considera la duración del día, expresado por el ángulo horario, pero se ha demostrado que sobre estima la radiación difusa para cielos despejados:

$$\frac{\overline{H}d}{\overline{H}} = 0.775 - 0.00605(\omega_0 - 90) - [0.505 + 0.00445(\omega_0 - 90)] \cdot \cos(114.6\overline{K}t - 103.1)$$
(EC.2.6)

Donde:

 ω_0 = Angulo de la Radiación incidente.

Para días concretos sean propuesto modelos alternativos, como el desarrollado por Liu-Jordan, resultando la siguiente ecuación:

$$\frac{Hd}{H} = 1.0045 + 0.4349Kt - 3.5227Kt^2 + 2.6313Kt^3$$
 (EC.2.7)

2.3. RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR.

El Ecuador se encuentra en la zona tórrida del planeta, por su ubicación privilegiada le permite tener 3 regiones continentales naturales sumamente diversas, como lo son Costa, Sierra y Amazonía. En el Ecuador y en la Provincia de Manabí se presentan los siguientes datos de Radiación Total Promedio:

- Ecuador: $4543 Wh/m^2/dia$
- Manabí: $4350 Wh/m^2/dia$

Estos valores se encuentran en parámetros anuales, promediados de toma diaria, de los últimos 24 años, esta información se encuentra detallada en la siguiente tabla con información del Cantón Portoviejo proporcionada, por el centro de investigaciones de la NASA:

Mes	Temp. Aire (°C)	Humedad Relativa (%)	La Radiación Solar Diaria Horizontal (kW/m ² /dia)	Presión Atm. (kPa)	Vel. Viento (m/s)	
Enero	24,9	71,3	5,47	97,8	2,1	
Febrero	25,2	75,5	5,30	97,8	1,9	
Marzo	25,1	75,9	5,81	97,7	1,7	
Abril	25,3	71,8	5,74	97,7	1,7	
Mayo	25,4	66,9	5,21	97,8	1,9	
Junio	25,1	61,8	4,09	97,8	2,4	
Julio	25,0	57,2	3,66	97,9	2,5	
Agosto	25,0	55,4	4,00	97,9	2,6	
Septiembre	24,9	57,8	4,37	97,9	2,4	
Octubre	24,8	61,1	4,40	97,9	2,4	
Noviembre	24,2	64,1	4,59	97,8	2,4	
Diciembre	24,4	67,4	5,22	97,8	2,3	
ANUAL						
Promedio	25,0	65,5	4,82	97,8	2,2	

En la tabla 2.1 se muestra los parámetros meteorológico de la ciudad de Portoviejo.

Tabla 2.1. Parámetros Meteorológicos de Portoviejo Fuente. NASA

Los datos anuales de radiación solar permiten visualizar el alcance que tiene el cantón para el aprovechamiento de la energía más abundante de nuestro sistema solar.

Para conocer la radiación solar por zona geográfica, se presenta el mapa solar del Ecuador generado por el Ministerio de Energía para el desarrollo de energía solar.


2.3.1.Mapa solar anual del Ecuador

Figura 2.3. Mapa solar del Ecuador Fuente: Atlas solar del Ecuador CONELEC 2010

2.4. EXERGÍA DE LA RADIACIÓN SOLAR.

A partir del estudio de la segunda ley se dieron varios conceptos partiendo de su enunciado, como lo son el de entropía libre o energía de Helmoltz y entalpia libre o energía de Gibbs; dos de las premisas termodinámicas que nos brindan la pauta para la posibilidad y capacidad de avanzar en el estudio de procesos irreversibles. En la década de los años 50, desde el punto de vista termodinámico se generó un nuevo concepto denominado Exergía el cual tuvo su origen por la necesidad de expresar la cantidad de energía disponible, dicho termino tiene su origen las ciclas "cantidad de trabajo (erg)" "que es liberado (ex)".

La exergía se define como una propiedad que permite determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado específico. Este potencial de trabajo es simplemente el trabajo útil máximo que puede obtenerse del sistema.

Un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado inicial especificado al estado de su ambiente, es decir, el estado muerto.

Habrá siempre una diferencia, grande o pequeña, entre la exergía y el trabajo real entregado por un dispositivo, diferencia que representa para los ingenieros la posibilidad para la mejora. (Farahat, Sarhadd, & Ajam, 2009).

La radiación solar que llega a la tierra se acompaña de una entropía de radiación por lo cual es muy importante estudiar la cantidad exacta de energía solar que llega al colector para determinar la energía real aprovechada por el colector y está mediante un proceso se convierta en trabajo. Cuando se quiera determinar la velocidad de producción de entropía dentro de cualquier dispositivo de conversión de energía solar, debe conocerse el flujo entrópico de radiación entrante. En esta contribución se debe realizar el cálculo del flujo de entropía de radiación que llega a la Tierra. Posteriormente realizar la interacción entre la radiación entrante y la superficie receptora que se identifica como una fuente de producción de entropía. Las eficiencias de conversión máximas para los colectores solares de placa plana expuesta por diferentes autores, investigada dentro del desarrollo de la investigación se encuentran entre 30 - 50% de la energía de radiación entrante, dependiendo de las condiciones atmosféricas.

2.4.1. Exergía por Transferencia de Calor.

La exergía, como la energía misma, puede transferirse de un cuerpo a otro; y esta transferencia se realiza mediante las tres formas: calor, trabajo y flujo másico. Cuando se produce la transferencia de energía relacionada a una masa fija o sistema cerrado se presenta únicamente en procesos de transferencia de calor y de trabajo.

El calor es una de las formas de energía más conocidas y utilizadas en el mundo y entre una de sus características se resalta su desorden, debido a que en la transmisión de energía solo una porción de él puede transformarse en trabajo que por lo contrario es una energía muy organizada. Siempre que se tenga un gradiente de temperatura entre la temperatura ambiente y un cuerpo es posible producir trabajo, transfiriéndolo a una máquina térmica que aproveche dicha transmisión de energía y de está se desprende cierto calor al medio ambiente, por dicho motivo se considera que en el proceso de transmisión de calor Q en una ubicación que se encuentra a una temperatura T siempre existirá la transmisión de exergía EX_{calor} y se manifiesta con la siguiente expresión:

$$EX_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q \qquad (kJ) \tag{EC.2.8}$$

Para nuestro caso Q representa la radiación solar que llega a la ciudad de Portoviejo.

2.4.2. Modelo Exergético de la Radiación Solar.

Por lo general para el cálculo de la radiación solar que llega a la superficie de nuestro planeta se emplea la ecuación desarrollada por el matemático y físico Petela, que se vale de la siguiente ecuación:

$$\dot{E}x_{radia} = A_{pla}I_T \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right)^4 \right]$$
(EC.2.9)

Donde:

 $T_{amb} = temperaura \ ambiente , ^K$ $A_{pla} = area \ de \ la \ placa \ absorbedora , \ m^2$ $I_T = radiacion \ solar \ que \ llega \ al \ colector$, W/m^2

$T_{sl} = temperatura \ del \ sol$, °K

El resultado de la aplicación de ésta ecuación nos permite la determinación de la energía útil que incide sobre el colector, misma que puede ser aprovechada para los fines correspondientes de acuerdo a los intereses del investigador.

2.5. USOS DE LA ENERGÍA SOLAR.

Cada año el sol arroja 4 mil veces más energía que la que consumimos. Siendo una importante fuente de energía con gran potencial para el consumo humano.

En comparación con la producción de energía a través de combustibles fósiles, tales como el carbón y el petróleo, el sol es una fuente de energía renovable más segura y menos contaminante.

Aunque actualmente la tecnología e infraestructura para el aprovechamiento de la energía solar está en proceso de desarrollo, esta fuente ya está siendo utilizada tanto en hogares como en industrias para la obtención de calor y electricidad.

2.5.1. Energía solar para hogares.

La energía solar, convertida en energía eléctrica a través de los captadores solares, puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades en un hogar. Por ejemplo, se puede obtener agua caliente para consumo doméstico, dar calefacción a nuestros hogares e incluso climatizar piscinas.

De la misma manera, la refrigeración es otra de las aplicaciones de la energía solar. Para obtener frío se debe disponer de una fuente cálida, la cual puede proveerse a través de paneles solares instalados en el techo de una casa. En la actualidad los principales aparatos que se usan recurriendo a energía solar térmica son los calentadores de agua y las estufas solares. Así mismo, ésta fuente se puede utilizar en pequeños instrumentos como cargadores, relojes o calculadoras.

2.5.2. Aplicaciones en el sector industrial.

Adicional al uso doméstico, la energía solar puede tener aplicaciones en la industria agropecuaria, en el sector de transporte y en la minería. Así mismo, el sector alimentario, textil y químico se beneficia de este tipo de energía renovable.

Entre los ejemplos más comunes de la aplicación de energía solar están los invernaderos solares, con las cuales se obtienen mayores y más tempranas cosechas. De igual forma, se utiliza la energía solar en secaderos agrícolas para la reducción en gastos e impacto ambiental.

La energía solar también puede ser aplicada en plantas de purificación o desalinización de aguas, sin consumir ningún tipo de combustible. Así mismo, sistemas de lavado y secado industrial también aprovechan esta fuente.

Los usos que se le puede dar a la energía solar son muy amplios y día tras día se están descubriendo nuevas tecnologías para poder aprovecharlas mejor. Cada vez más personas y empresas se unen a la utilización de energía solar como fuente de sus actividades- Este panorama resulta positivo para el medio ambiente pues reduce el uso de hidrocarburos y sus negativos efectos como la destrucción de la capa de ozono y el calentamiento global. (Eco-Active, 2013)

CAPITULO III.

3. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y GEOMETRICAS DE UN COLECTOR SOLAR DE AIRE DE PLACA PLANA.

3.1. COLECTORES SOLARES DE AIRE DE PLACA PLANA DE TIRO FORZADO.

Un colector solar transforma la energía solar incidente en otra forma de energía útil. Difiere de un intercambiador de calor convencional en que en éstos se realizan intercambios térmicos entre fluidos con elevados coeficientes de transferencia térmica, y en los que la radiación es un factor sin apenas importancia; en un colector solar, la transferencia térmica se realiza desde una fuente energética, (el Sol), a un fluido, sin concentración de energía solar, por lo que el flujo incidente puede ser del orden de 1 kW/m2 variable con una serie de parámetros. La gama de longitudes de onda que se aprovecha está comprendida entre 0,3 μ m y 3,0 μ m, que es una franja de radiación considerablemente más pequeña que la de la radiación emitida por la mayoría de las superficies que absorben energía. (EnerSolarTermica, 2010)

Los colectores solares planos se pueden diseñar para calentar fluidos hasta temperaturas moderadas, máximo de 90°C. Estos dispositivos usan tanto la componente directa como la difusa de la radiación solar, no requieren un seguimiento del sol y necesitan poco mantenimiento. Los colectores solares planos se clasifican dependiendo del fluido de trabajo que emplean en colectores solares de líquido y colectores solares de aire. Los colectores solares de líquido se emplean más para Agua Caliente Sanitaria y calefacción, mientras que los de aire se emplean más para el secado de variedades de productos. (Martín C, 2012, pág. 61)

Fundamentalmente un colector placa plana con circulación forzada está compuesto de cuatro componentes primordiales que son: una cubierta transparente que por lo general es vidrio o plástico, un absorbedor que puede estar fabricado con diversos materiales como cobre, plástico, acero, entre otros (deben pintarse de color negro para poder aumentar la capacidad de absorción a la radiación solar para aprovecharla al máximo, la reflexión en la superficie debe ser mínima), carcasa y aislamiento. La circulación forzada se realiza a través de un ventilador.

Su principio es basado en el cuerpo negro, de esta forma el colector aprovecha la energía calórica que emite el sol, almacena el aire frío proveniente del ambiente por la circulación forzada, el cual es enviado a la placa absorbente donde se calienta de forma básica por la convección de la radiación del sol, seguidamente lo expulsa para el uso correspondiente. Estos procesos dependen de los componentes del equipo, forma, propiedades de materiales, ángulos de radiación solar, posicionamiento del equipo y otras variables que se analizarán con el diseño de este equipo. (Varela A, 2007, págs. 2-14)

El análisis de los colectores solares implica problemas particulares de flujos de energía, bajos y variables, así como una gran relevancia de los fenómenos de radiación. En los colectores de placa plana, la superficie que absorbe la radiación solar es igual a la superficie que la capta. El coste de la energía obtenida en un colector de placa plana depende del rendimiento térmico del sistema, de su vida media y de los costes de fabricación.

Se pueden clasificar con diversos criterios que dependen del enfoque que se quiera dar al propósito. De forma generalizada la clasificación se realiza por el aprovechamiento térmico de la energía solar en tres grupos:

Colectores de baja temperatura.- Suministran calor útil a temperaturas menores a 90° C mediante absorbedores metálicos o no metálico para aplicaciones como invernaderos, calentamiento de agua o para el secado de granos en el sector agrícola y todas aquellas actividades en las que el calor de proceso no es mayor a 90°C.

Entre estos tipos de colectores tenemos los de placa plana (con cubierta y sin cubierta) los cuales son los más representativos y los colectores de tubo de vacío que pueden llegar hasta temperaturas de 130° C considerándose también dentro de este grupo. Con relación al grupo de colectores solares de baja temperatura, en la tabla 3.1 se manifiestan valores propios de los parámetros característicos de eficiencia óptica, coeficiente global de pérdida y rango normal de temperaturas de trabajo.

Tipo de colector	Eficiencia óptica	Eficiencia ópticaFactor de pérdidas térmicas. (W/m²ºK)	
Sin cubierta	0.90	15-25	10-40
Cubierta simple	0.80	7	10-90
Doble cubierta	0.65	5	10-90
Tubos de vacío	0.70	2	10-130

Tabla 3.1. Parámetros característicos de los distintos colectores solares. Fuente: CENSOL AR

Colectores de temperatura media.- Son aquellos dispositivos que concentran la radiación del sol para poder entregar calor útil a mayor temperatura, la cual se encuentra dentro del rango desde los 130 °C a los 300 °C. Dentro de este grupo encontramos a los concentradores estacionarios y a los canales parabólicos, todos ellos efectúan la concentración a través de espejos dirigidos hacia un receptor de menor tamaño. El inconveniente que presentan únicamente es el de trabajar con la componente directa de la radiación del sol por lo que su uso queda limitado a zonas de alta insolación.

Colectores de alta temperatura.- Operan a temperaturas mayores a los 500 °C y su aprovechamiento se enlaza a la generación de electricidad y a transmitirla a la red eléctrica. Existen básicamente en tres tipos diferentes que son: los sistemas de torre central, la nueva generación de canal parabólico y los colectores de plato parabólico. En varios países estos sistemas se operan por productores autónomos y se los instala en lugares donde las posibilidades de días nublados sean transitorios. (Larrea. & Bayas.H., 2011)

En los colectores solares intervienen tanto las variables térmicas y geométricas que pueden ser analizadas para posteriormente ser modificadas en la cual permita tener un rendimiento más alto que nos ofrezca un trabajo óptimo.



Figura 3.1.Captacion de energía solar para el colector Fuente: (Bioclimática, 2012)

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL COLECTOR SOLAR.

En referencia a la tecnología de la energía solar fototérmica el colector solar placa plana de aire constituye el elemento más distintivo, pueden estar construidos en diferentes materiales, pero siempre su aplicación se basa en el mismo principio llamado efecto invernadero.

El primordial objetivo en la selección de los materiales es colectar la mayor cantidad de energía solar disponible de forma ideal al menor costo total permitido. Además influye el criterio del uso que se requiera, ya sea para trabajos que demandan temperaturas mayores a 10 °C o menores de 90 °C como es el caso de la deshidratación de productos agrícolas donde se deben emplear colectores de aire que estén definidos con materiales y temperaturas adecuadas para que los productos sometidos a estos procesos no pierdan sus características de calidad y composición.

Los elementos principales del colector son: 1. Carcasa, 2 Cubierta, 3. Placa absorbedora, 4. Aislante. Cada uno de estos elementos cumple una función diferente de acuerdo a sus características propias, las representaremos gráficamente en la siguiente figura:



Figura 3.2. Componentes de un colector solar placa plana de aire con tiro forzado. Fuente: Google

3.2.1. Cubierta.

Es una tapa transparente la cual asegura la estanqueidad al medio exterior, mantiene aislado térmicamente al dispositivo y lo protege físicamente, además produce el efecto invernadero al permitirle el paso a la energía radiante y almacenar la energía calórica. Se ubica en la parte superior y está orientada al sol y fijada a la carcasa del colector con gomas o siliconas. Los materiales utilizados son el vidrio y el plástico.

El principal material utilizado hasta ahora es el vidrio, que presenta una transmitancia en torno al 94% debido a las pérdidas por reflexión en las dos interfaces de la materia, lo que implica una disminución del 6% de la radiación del absorbedor.

Las láminas de plástico y filmes delgados también poseen un alta transmitancia a la onda corta. Sin embargo, los plásticos tienen limitantes en que se deterioran con altas temperaturas, hasta pueden tener cambios dimensionales. Solo algunos tipos de plásticos pueden permanecer largos periodos intactos frente a la radiación ultravioleta solar. (Redriguez, 2012)

Las cubiertas de vidrio no presentan problemas de degradación del material por efecto de la temperatura, pero es frecuente la rotura por problemas de expansión térmica, debido a un mal diseño del sistema de fijación de la cubierta o por poca rigidez del colector. (Larrea & Bayas, 2011)

El vidrio es un material inorgánico transparente, duro y frágil que se lo localiza en la naturaleza, este también puede ser producido de forma artificial el cual se lo obtiene a partir de la arena sílice, la caliza y el carbonato de sodio a 1550 °C aproximadamente. Su conductividad térmica es de 0.78 W/m °K, su índice de refracción *n* varía entre 1.52 *a* 1.66, su absortancia de onda corta esta entre 0.4 μm a 0.70 μm y su emitancia de onda larga es de 0.84 μm .

En la tabla 3.2 se muestra los materiales para la selección de cubierta del colector solar con espesores recomendados y sus características.

MATERIAL	COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN (%)	GROSOR (mm)	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (m/m/°C)
Policarbonato(ll exan,merlon)	82-89	3,2	125	$67.5 * 10^{-6}$
Plástico reforzado con fibra de vidrio	77-90	2,0	92°C produce 10% de pérdidas de trasmisión	36 * 10 ⁻⁶
Vidrio ordinario (0,13 % hierro)	85	3,2	870°C no temperado 3500 °C temperado	8.6 * 10 ⁻⁶
Vidrio blanco (0,01 % de hierro)	85-91	3,2	870°C no temperado 3500 °C temperado	$15.4 * 10^{-6}$

Tabla3.2: Materiales de cubierta y sus características Fuente: Trasferencia de Calor y Masa Yunes A. Cengel 7ma Edición

3.2.2. Placa Absorbente.

El absorbedor constituye el elemento absorbente de la radiación solar. Puede estar fabricado con diferentes materiales como plástico, cobre, acero o aluminio, aunque este último no es muy aconsejable ya que con frecuencia da origen a problemas de corrosión. La placa debe estar pintado de color oscuro con el fin de aumentar su capacidad de absorción a la radiación, con objeto de que ésta se aproveche al máximo, la reflexión en su superficie debe ser muy baja. Por otra parte, hay que prever que se alcancen temperaturas del orden de los 90°C y, por tanto, han de elegirse correctamente los materiales y pinturas (negra cristal con un coeficiente de absorción de 0.95 y una emisividad de 0.66).

La radiación solar que incide directamente sobre el absorbedor, está comprendida entre longitudes de onda del orden de 0.25 y 2.5 μ m, perteneciendo por tanto a la fracción del infrarrojo en sus longitudes de onda más pequeñas, así como al visible y parte del ultravioleta en sus longitudes de onda mayores. En lo que respecta a la máxima emisión del sol, se sitúa en torno a los 0.5 μ m de longitud de onda y corresponde por tanto al espectro visible. Estas consideraciones deben tenerse muy presente a la hora de elegir la pintura para el absorbedor ya que su coeficiente de absorción, para las longitudes de onda señaladas, ha de ser elevada, del orden de 0.9 - 0.95 μ m.

Las radiaciones emitidas por la placa absorbente se sitúan en el infrarrojo, con valores de longitud de onda comprendidos entre los 4 y 70 μ m. Estas radiaciones deben limitarse lo máximo posible para mantener una temperatura alta en el absorbedor, y por tanto deben emplearse pinturas que cumplan con dicho objetivo. Por tanto, estas pinturas deben ser selectivas en el sentido de poseer un gran coeficiente de absorción para las longitudes de onda del espectro solar y muy bajo poder emisivo para los infrarrojos que emite el absorbente.

La mayor parte de las superficies que tienen alto poder de absorción para la radiación solar son a su vez excelentes radiadores térmicos; sin embargo, las superficies selectivas son capaces de absorber efectivamente la radiación solar mientras que irradian calor en pequeña proporción. (Martin, 2012). Generalmente en los colectores solares de placa plana se utiliza el cobre en la placa absorvente, este es un material metálico de transición color rojizo se acentúa por ser uno de los mejores conductores de electricidad. Gracias a su elevada ductilidad, conductividad eléctrica y maleabilidad se ha convertido en un material de uso primordial en el mundo para un sinnúmero de tareas.

La densidad de cobre es de 8900 Kg/m³, su conductividad térmica es de 401 W/m °K, su difusividad térmica está entre 107,45 - 111,20 x 10^{-6} m²/s, la absortividad de este depende si se encuentra muy pulido es de 0.18 y si está decapado es de 0.25.

El material a utilizar para el estudio, teniendo en cuenta las implicaciones económicas y de rendimiento como placa absorbedora es la plancha de acero galvanizado de 1/16", sus características como densidad es 7850 kg/m³ y su conductividad térmica se encuentra en el rango de 47 a 58 W/m °K. En la tabla 3.3 se muestra las propiedades térmicas de algunos materiales usados para la placa absorbedora.

MATERIAL	DENSIDAD (Kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/Kg.ºK)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m·°K)
Acero Galvanizado	7850	460	58
Aluminio	2700	909	232
Cinc	7140	389	140
Madera	840	1381	0,13
Yeso	1800	837	0,81

Tabla3.3: Conductividades térmicas de algunos materiales. Fuente: Trasferencia de calor y masa Yunus A. Cengel 7 Edición

3.2.3. Aislamiento.

Es el elemento que se ubica en la parte interior del colector solar recubriendo la carcasa, para así evitar las pérdidas térmicas por convección en los laterales y en la base. Los materiales usados son espuma de poliuretano rígido, fibra de vidrio semi rígida, lana mineral entre otros. Las finalidades primordiales que se le atribuyen a este elemento son: resistir temperaturas altas sin deteriorarse, poca adherencia a la cubierta, al descomponerse con el tiempo y por temperaturas altas poseer poca emisión de vapores, resistir la humedad sin perder propiedades, tener un coeficiente de dilatación factible con el dispositivo y mantener un bajo coeficiente de conductividad.

Se va a emplear como aislante la espuma de poliuretano, que es un material sintético altamente reticulado. Se obtiene a través de la mezcla de dos componentes formados mediante procesos químicos de la azúcar y el petróleo.

La espuma de poliuretano es el material como mayor recomendación por parte de investigadores y constructores de colectores solares ya que posee una propiedades con buen rendimiento y el factor más relevante es que posee una elevada capacidad como aislante ya que tiene muy baja conductividad de 0,024 W/m°C

La duración de la espuma de poliuretano es indefinida si se la protege debidamente, además posee una muy buena adherencia a los materiales usados en la construcción del colector solar de aire dificultando el crecimiento de bacterias y hongos, posee una alta resistencia a la absorción de humedad y tiene una excelente estabilidad dimensional para temperaturas desde -200 °C hasta 100 °C.

El materiales como aislante que vamos a utilizar en esta investigación, donde se realizó un análisis de una gran cantidad de materiales y el más apropiado por su factor económico y su coeficiente de conductividad que es el requerido, el cual es el Poliestireno expandido que posee una elevada capacidad como aislante ya que tiene una muy baja conductividad oscilan 0.023 y 0.026 W/m °C En la tabla 3.4 se muestra diferentes materiales aislante con el espesor recomendado para la construcción del colector solar de placa plana.

MATERIAL DENSIDAD ESPESOR CONDUCTIVIDAD							
Fuente: (termocan, 2011)							
Tabla 3.4. Principales propiedades y espesores recomendados de aislantes para colectores solares placa plana.							

MATERIAL	DENSIDAD (Kg/m ³)	ESPESOR (mm)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/(m·K))
Espuma de poliuretano	40	20-60	0,023-0,026
Lana de vidrio	100	30-70	0.032
Poliestireno expandido	25	15-70	0.024
Serrín	215	20-50	0.071
Madera	840	10-50	0.130

En la tabla 3.5 se muestra el coeficiente de conductividad térmica de algunos materiales

que se pueden utilizar como aislante para el colector solar de placa plana.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m.ºk)
Vidrio celular	0,050
Fibra de vidrio (ligamento orgánico)	0,0036
Poliestireno expandido (bolitas moldeadas)	0,024
Poliuretano expandido (<i>R</i> -11 expandido)	0,023
Perlita expandida (ligamento orgánico)	0,052
Caucho expandido (rígido)	0,032
Fibra mineral con aglomerante de resina	0,042
Corcho	0,039
Espuma de poliuretano	0,023-0,026
Fibra de vidrio	0,038-0,039

Tabla 3.5.: Propiedades de materiales aislantes.

Fuente: Trasferencia de calor y masa Yunnus Cengel 7 Edición

3.2.3.1. Revestimiento del Absorbedor.

Es muy importante utilizar revestimiento en la cara del absorbedor expuesta al sol. Para esto se recurra a dos procedimientos: pinturas y superficies selectivas.

El tipo de revestimiento del absorbedor va a determinar la fricción de la energía solar incidente absorbida.

Las pinturas negras o de color oscuro tienen un determinado coeficiente de absorción α entre 0,92*y* 0,96 ; esto quiere decir que absorben entre 92 y 96 % de la radiación incidente de onda corta.

ΜΑΤΕΡΙΑΙ	COEFICIENTE DE	COEFICIENTE DE
MATERIAL	ABSORCIÓN α	EMISIVIDAD <i>ε</i>
Pintura acrílica negra	0,92-0,97	0,84-0,90
Pintura negra común	0,95	0,89-0,97
Zinc negro	0,90	0,10
Hierro negro sobre acero	0,90	0,10

Tabla 3.6: Característica de Revestimiento Absorbente Fuente: (Colector Solar , 2010)

3.3.4. Carcaza.

La carcasa del colector solar debe de fabricarse con un tipo de material el cual proporcione rigidez suficiente a todos los elementos del colector. El diseño debe de adecuarse con el fin de que no se produzcan tensiones por expansión térmica de la cubierta para que no ocasione la rotura de ésta y el ingreso de agentes en el colector.

Por otra parte, los principales lineamientos que este elemento debe cumplir con relación a las condiciones internas y externas son: resistir la presión del viento, corrosión, asegurar la estabilidad y se debe de facilitar el desmontaje, montaje y el mantenimiento del conjunto del colector.

Por lo general se fabrica en acero galvanizado, aluminio anodizado y madera. En el presente proyecto para la construcción del colector solar de aire vamos a utilizar el acero

galvanizado ya que a nivel global es uno de los materiales que brinda la mayor variedad de aplicaciones y usos en construcción por ser una protección versátil y económica con una alta resistencia a la abrasión y a la corrosión.

El acero galvanizado es aquel que se obtiene después de un proceso de recubrimiento de varias capas de la aleación de hierro y zinc. La galvanización es un procedimiento para recubrir piezas terminadas de hierro/acero mediante su inmersión en un crisol de zinc fundido a 450 °C. El recubrimiento galvanizado le otorga al acero una excelente protección, entregándole propiedades idóneas para ambientes exigentes. (Terold, 2011)

La densidad del acero galvanizado es de 7850 kg/m³ y su conductividad térmica se encuentra en el rango de 47 a 58 W/m °K.

3.3.5. Circulación forzada del colector solar de aire.

En la circulación forzada en el colector solar el aire es desplazado por un ventilador que consume energía eléctrica. Previamente hay que realizar a esto es muy importante el cálculo para la selección del ventilador, porque se tendrá que manejar variables para obtener el flujo de masa adecuado para realizar la investigación y obtener mejor en eficiencia de colectores tradicionales, lo cual resulta un ahorro económico y tiempo en el secado de grano Este tipo de circulación facilita el diseño en el caso de los equipos de tamaño grande, además de facilitar el control del proceso de secado. La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica para el ventilador, pero esto se puede solventar utilizando un módulo solar que proporcione el flujo de aire requerido, con lo que el sistema seria independiente de la red eléctrica. (Agrowaster, 2013)

La selección de la potencia del ventilador se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{1}{2} m v^2$$
 (EC. 3.1)

Donde:

W = potencia ,W m = masa ,Kg/seg v = velocidad ,m/seg

La carcaza del ventilador centrífugo ha sido diseñada para trabajar con turbinas de diámetros de 19cm- 26cm.

La carcaza tiene un diámetro de 36 cm para poder evacuar la masa de aire que se encuentra en su interior y a través de los ductos enviarla al colector.

Referente al uso de los ventiladores para la circulación forzada nos valemos según su clasificación en dos tipos:

a). Los ventiladores axiales el escurrimiento del aire es paralelo al eje de rotación, al que están fijas las aspas. Este eje es, generalmente, el mismo eje del motor de impulsión. El conjunto va montado al interior de un cilindro que sirve de alojamiento. Están destinados a aplicaciones en lugares donde las presiones estáticas que hay que vencer son bajas y los flujos son elevados.



Figura3.3. Clasificación de ventiladores axiales. Fuente: (Varela A.2007)

b). Los ventiladores centrífugos sirven para las presiones estáticas elevadas. En nuestro proyecto las características del ventilador centrífugo que se eligió para la circulación forzada se dio mediante investigación de trabajos anteriores que por rendimiento este es más el óptimo, el cual se analizó con variables geométricas y térmicas para la construcción del colector solar El ventilador centrífugo calienta más el aire porque se aprovecha la energía que libera el motor eléctrico. Se compone de un rotor que gira al interior de una carcasa en espiral. El aire entra al rotor axialmente y luego el ventilador lo mueve, del centro a la periferia, por acción de la fuerza centrífuga.



Figura 3.4. Clasificación de álabes en ventiladores centrífugos. Fuente: (Varela, Diseño y construcción de un colector solar plano convencional para calentamiento de aire, para placas intercambiables, 2007)

En los colectores solares para calentamiento de aire se recomiendan mantener la velocidad del aire entre de 2,5 a 5m/seg.

En la tabla 3.7 se muestran criterios para la selección del ventilador y adaptación al colector solar de placa plana.

Ventileden	Presión	Partículas	Ubicación	Corrosión	Costo	Caudal
ventriador	KPa	KPa -	-	-	\$	m ³ /s
Axial	(-)	(=)	(=)	(+)	(+)	(-)
Centrífugo	(+)	(=)	(=)	(-)	(-)	(+)

Tabla 3.7 Parámetros de Evaluación del ventilador. Fuente: (Varela, Diseño de un colector solar para el calentamiento de agua, 2007)

3.3. VARIABLES TÉRMICAS DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE.

Las variables térmicas constituyen una parte esencial en el funcionamiento del colector solar de aire con base a estudios se han destacado las principales variables térmicas que son: la temperatura ambiente a diversas horas (radiación del sol), el viento, la temperatura de entrada en el colector (conducción) y la convección aplicado en el colector.



Figura. 3.5. Variables térmicas que intervienen en un sistema solar térmico. Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Coeficiente de Convección del Aire.

El coeficiente de transmisión de calor sólido-fluido o coeficiente de convección, α (W / m2 °C); es variable con la geometría del sólido, la orientación, la naturaleza del fluido y del tipo de convección.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$Q_{conv} = h A_s \left(T_s - T_{\infty} \right) \tag{EC.3.2}$$

Donde:

$$h = C$$
oeficiente de transferencia de calor por convección , W/m² · $^{\circ}$ K

 T_s = Temperatura de la superficie , ^oK

 T_{∞} = Temperatura del fluido , ^oK

 $A_s = \text{área superficial}, m^2$

 $Q_{conv} = Tranferencia de calor por convección , W$

El coeficiente de transferencia de calor por convección dad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo.

Para realizar el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección, se define el número de Nusselt, que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que discurre un fluido (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

Los colector solares de aire de placa plana son intercambiadores de calor por radiación, los cuales transforman la energía radiante solar en calor, que se transfiere por convección desde la placa absorbedora al fluido (Kurtbas and Turgut, 2006). De acuerdo con esta definición, la transferencia de calor obtenida se puede dar en términos de número de Nusselt

$$N_u = \frac{h * D}{k} \tag{EC.3.3}$$

Donde:

 $h = \text{coeficiente de transferencia de calor}, W/m^2 \cdot {}^{\circ}K$

k =conductividad termica del aire , $W/m^{\circ}K$

D =longuitud equivalente , m

De Acuerdo del valor de Reynolds tendremos flujo laminar o turbulento.

```
Para flujo laminar en ductos cuadradosR_e < 2400Para el flujo turbulento en ductos cuadradoR_e > 2400
```

Para el obtener el Número de Nusselt, aplicamos la correlación de Hilpert que se muestra en la ecuación 3.4.

$$Nu = \frac{h D}{K} CRe^m Pr^{\frac{1}{3}}$$
(E.C.3.4)

Donde:

Nu = Número de Nussetl

c y m =Constante de la Ecuación para ductos rectangulares

Re = Número de Reynolds

Pr =Número de Prandtl

Para encontrar el coeficiente de transferencia calor por convección en el ducto rectangular lo realizamos con la ecuación 3.5

$$h = Nu\frac{k}{p} \tag{EC.3.5}$$

Tabla 3.8: Correlación de Hilpert	para flujo de aire s	obre un paralelepípedo
Fuente: Formulas, tablas de	transferencia de C	alor Tecnun 2010

Geometría	Dibujo	Re _D	С	т
Cuadrado en diagonal	<u>∼</u> ↓ □	5·10 ³ - 10 ⁵	0,246	0,588
Cuadrado recto		5·10 ³ - 10 ⁵	0,102	0,675
Hexágono recto		$5 \cdot 10^3 - 1,95 \cdot 10^4$	0,160	0,638
		1,95·10 ⁴ - 10 ⁵	0,0385	0,782
Hexágono en diagonal	<u> </u>	$5 \cdot 10^3 - 10^5$	0,153	0,638
Placa vertical	→ [] ‡ D	$4.10^3 - 1.5.10^4$	0,228	0,731

En la tabla 3,9 se muestra valores típicos de coeficiente de transferencia de calor por convección que se puede emplear para el cálculo de transferencia de calor.

TIPO DE CONVECCIÓNCOEFICIENTE DE CONVECCIÓN h,
(W/m².C)Convección Libre de Líquidos10-1000Convección Forzada de Gases25-250Convección Forzada de líquidos50-20000Ebullición y condensación2500-100000

Tabla 3.9.Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección Fuente: Transferencia de calor y masa, 6ta Edición

Se puede calcular el coeficiente convectivo promedio de la zona de la placa-cubierta empleando la siguiente expresión:

$$\overline{h}_{c,p-c} = \frac{\overline{Nu_L}k_{a,c-p}}{L_{c-p}} \tag{EC.3.6}$$

En donde:

 $\overline{Nu_L}$ = Corresponde al número de Nusselt promedio, Adimensional.

 $k_{a,c-p}$ = Es el coeficiente de conductividad del aire, W/m °K.

 L_{c-p} = Es el espaciamiento entre la placa y la cubierta, m.

El coeficiente radiactivo en la zona de la placa-cubierta se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_{prom} + T_{cub})(T_{prom}^2 + T_{cub}^2)}{\frac{1}{\epsilon_p + \epsilon_c - 1}}$$
(EC.3.7)

Se tiene que:

 σ = Es la constante de Stephan-Boltzman, W/m²K⁴.

 T_{prom} = Temperatura promedio del absorbedor, °K

 T_{cub} = Temperatura promedio de la cubierta, °K.

 ϵ_p = Emisividad de absorbedor, adimensional.

 ϵ_c = Emisividad de la cubierta, adimensional.

Teniendo en cuenta la figura 3.5 denotamos las variables térmicas presente durante la operación del colector solar, hay que recalcar también que todas estas variables térmicas y geométricas como la temperatura de ingreso al colector, la radiación incidente, velocidad entre otras, que generan pérdidas en el sistema de este dispositivo las cuales deben de ser estudiadas para lograr un mejor rendimiento en el colector. Más adelante representaremos las perdidas térmicas en el colector solar y transferencia de calor por aire (condiciones normalizadas, las perdidas por efecto del viento y las pérdidas por calor almacenado).

Se especifica que en la parte climatológica en la ciudad a ejecutar el proyecto (Portoviejo) las coordenadas son -1°04' de latitud Sur y -80°27' de longitud Oeste. La presión atmosférica promedio es de 0.99573917 atm, la temperatura promedio es de 26 °C, en cuanto al viento su valor en velocidad media mensual es de 1.06 m/s (se utilizará un anemómetro para medir la velocidad del viento), datos obtenidos para un promedio desde el año 1985-2016.

3.3.2. Número de Reynolds en colectores solares de placa plana.

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la configuración geométrica de la superficie, de la aspereza superficial, de la velocidad del flujo de la temperatura de la superficie y del tipo de fluido, entre otras cosas. Después de experimentos exhaustivos, en la década de 1880, Osborn Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se conoce como número de Reynolds, el cual es una cantidad adimensional.

La fricción del fluido viscoso sobre la superficie del sólido provoca una tensión de cizalladura proporcional al gradiente vertical de velocidades. La distribución de velocidades va desde cero en el contacto con la superficie hasta la velocidad máxima para las zonas alejadas de la superficie. La región comprendida entre ambos estados se denomina capa límite superficial.

El espesor de la capa límite es función del recorrido del fluido sobre el sólido y comprende la zona donde las velocidades de las capas de aire varían por efecto de la fricción viscosa. Este espesor depende de si el flujo es laminar o turbulento, la que se puede observar en la figura 3,6.



Figura 3.6: Flujo paralelo sobre placa plana Fuente: Yunus A. Cengel, Transferencia de Calor y Masa

Para determinar si el fluido es laminar o turbulento se determina el número de Reynolds. El mismo que sirve para caracterizar el tipo de flujo, laminar o turbulento. Podemos ver como la transición a la turbulencia ocurre en una posición corriente abajo (X_c), para la que se alcanza un número de Reynolds crítico Re_c .

$$R_e = \frac{\rho * \nu * D}{\mu} \tag{E.C.3.8}$$

Donde

 $\rho = \text{Densidad del aire}, \frac{kg}{m^3}$ D = Longitud equivalente, m $v = \text{Velocidad del aire}, \frac{m}{seg}$ $\mu = \text{Viscosidad dinámica}, N * \frac{s}{m^2}$

3.3.3. Número de Reynolds en ductos cuadrados

Siempre que se resuelve un problema de flujo de fluidos, es necesario determinar primero el régimen del flujo.

Si el número de Reynolds en un ducto rectangular < 2400 el flujo es laminar y si es > 2400 el flujo es turbulento.



Figura 3.7: Perfil de número de Reynolds en un ducto rectangular Fuente: (CUBILLOS, 2013)

En la tabla 3.10 se muestran las propiedades termo físicas del aire a presión atmosférica, en la cual están las propiedades del aire a diferentes temperaturas, para tener más exactitud en los cálculos.

Temp. [°C]	Densidad [kg/m ³]	Viscosidad absoluta [Pa s] 10 ⁻⁵	Viscosidad cinemática [m ² /s] 10 ⁻⁵	Prandtl (Pr)	Cp [J/kg K]	Cv [J/kg K]
0	1,29	1,71	1,33	0,786	1000	716
25	1,19	1,84	1,56	0,758	1004	719
50	1,09	1,95	1,79	0,737	-	-
100	0,946	2,17	2,30	0,720	1010	723
150	0,835	2,38	2,85	0,700	-	-
200	0,746	2,57	3,45	0,690	1020	737
250	0,675	2,75	4,08	0,686	-	-
300	0,616	2,93	4,75	0,684	1040	758

Tabla 3.10 propiedades termofisicas del aire a presión atmosférica Fuente: formulas, tabla de trasferencia de calor Tecnun 2010

3.3.4. Densidad y Viscosidad del Aire.

La densidad a la relación existente entre la masa de un cuerpo y la unidad de volumen, por lo cual esta propiedad es muy importante para el desarrollo del cálculo del flujo másico, dependiendo de la sustancia de trabajo el flujo variara por su densidad. La viscosidad es una propiedad muy importante en los fluidos, representan la resistencia de las moléculas que tiene los líquidos o fluidos a ser conducción fácilmente. En los colectores solares tiene mucha importancia esta propiedad ya que es un dato fundamental para el cálculo de número de Reynolds y para caracterizar qué tipo de fluido que tenemos en cierto proceso.

El aire está formado por: 78.080% de nitrógeno (N2), 20.940% de oxígeno (O2), 00.035% de dióxido de carbono (CO2) y 00.930% de gases inertes, como argón y neón.

3.3.5. Velocidad en el colector solar de placa plana

En los colectores solares para calentamiento de aire se debe mantener la velocidad del aire alrededor de 2,5 m/s, pues una velocidad del aire inferior a dicho valor reduce la eficiencia de los colectores, y si sube de 5 m/s, causa elevadas pérdidas de carga en el sistema." (Varela, Diseño de un colector solar para el calentamiento de agua, 2007)

Para determinar la velocidad a la entrada y salida del colector se utilizó un anemómetro de paletas variables cuyo dato permiten determinar el flujo másico de entrada y salida del colector.

Para la experimentación de la investigación y poder estudiar la velocidad en diferentes intervalos en el colector solar, se regula la velocidad mediante un selector de velocidades el cual nos permite obtener tres puntos de velocidades.

El trabajo de los selectores de velocidades depende mucho de las características del motor a utilizar para la generación del viento dentro del colector, ya que por lo general los motores tienen tres velocidades.

Para obtener más intervalos de velocidad se utiliza tres turbinas adaptables cuyos diámetros son respectivamente de 24 y 26 cm, en la cual se puede obtener unos intervalos de seis velocidades lo cual es factible realizar durante el ensamblaje del ventilador centrífugo.

3.3.6. Flujo de Masa de Aire.

El flujo másico del aire que circula a través del colector, se calcula tomando el promedio de los flujos másicos en dos puntos diferentes, uno de ellos, en la sección circular del cono de entrada del aire al colector, y el otro en la sección circular del cono de salida del aire del colector

El aire interior se calienta a partir de la energía absorbida por la placa absorbedora y a su vez éste pierde energía hacia la cubierta del colector.

Para determinar el flujo másico en colector solar de placa plana empleamos con la siguiente ecuación:

$$m = \rho V A \tag{EC.3.9}$$

Donde:

m = Flujo másico, kg/seg $\rho = \text{Densidad del aire, } \frac{kg}{m^3}$ V = Velocidad, m/seg $A = \text{Área de sección circular, } m^2$

3.4. VARIABLES GEOMÉTRICAS DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE.

Las variables geométricas son la relación de las medidas para el estudio de los colectores solares, también es una de los datos primordiales que se pueden modificar tendiendo a mejorar el rendimiento exergético.

En la figura 3.8 se representan las variables geométricas del colector, las cuales se las hace variar experimentalmente para verificar la capacidad de captación de la energía solar, llegándose a probar con colectores más largos, y menos anchos, menos largo y más anchos, es decir una serie de combinaciones geométricas buscado optimizar el recurso energético.



Fuente: Gambit

Hay que tomar en consideración que los materiales que se utilicen durante el ensamblaje del colector tengan las medidas adecuadas siguiendo modelos de colectores tradicionales que especifican por lo general su construcción con una relación de 2 a 1 con respecto al largo y ancho. Por lo general existen uniones en el colector para las que se deberán utilizar una serie de empaques, cauchos, bases entre otros, para disminuir las pérdidas de calor y sean casi nulas y así obtener una mejor operación del colector para obtener una larga vida útil.

3.4.1. Esbeltez del Colector.

La esbeltez en términos de construcción es una característica de la relación entre la longitud y ancho, los colectores solares de placa plana se hace referencia a la esbeltez porque es muy importante para el desarrollo del trabajo del mismo, por lo que se recomiendan utilizar para la construcción una esbeltez de 2. Este término esbeltez viene en diferentes aplicaciones pero siguiendo el mismo contexto; por ejemplo, cuando se refiere a la característica mecánica de los perfiles estructurales que relacionan la rigidez de la sección transversal por la longitud total.

Se debe tener en cuenta que siempre en un colector solar existen dos tipos de área como son: el área bruta o total y el área útil o aprovechable. En este caso el área que nos interesa para el desarrollo de la investigación, es la aprovechable la cual tendrá una longitud de 160 cm y una ancho de 80 cm por lo que el área $A_c= 1.28 \text{ m}^2$.

3.4.2. Inclinación del colector solar.

La inclinación está dada por la latitud del lugar a emplear el dispositivo captador de energía solar más 10° como inclinación mínima o 15° como inclinación máxima.

En este caso el colector solar de placa plana funcionará en la ciudad de Portoviejo-Manabí donde la latitud es de 1°.04´ Sur. Empleando los parámetros nombrados anteriormente establecemos que la inclinación adecuada es de 16°.

Para obtener la orientación del colector solar simplemente aplicaremos el criterio que si la latitud es Sur la orientación sería hacia el Norte y si la latitud fuera hacia el Norte la orientación se establecería hacia el Sur.

3.4.3. Altura del colector

La altura comprendida entre la cubierta de vidrio y la placa absorbedora generalmente está comprendida entre los valores 5 ,7.5 y 10 cm.



El estudio que se realiza es el comportamiento de los colectores en función de sus parámetros de diseño, la modelación computacional en la herramienta virtual GAMBIT, permite manipular la altura entre la placa absorbedora y la cubierta, los valores escogidos de acuerdo a trabajos previos son e = 3 cm, 5 cm, 7,5 cm y 10 cm, permitiendo establecer la altura optima del colector en parámetros cercanos a 7,5 cm.

La altura del colector solar de placa plana es una de las variables geométricas importante, entre mayor altura implica menor calentamiento de aire, por lo cual se desarrolla perdidas en el interior del colector, teniendo en cuanta que se tiende a aumentar la destrucción de exergía que se dan el colector solar de placa considerando la capacidad que tiene el absorbedor para retener calor, por lo cual se escapa calor desde la placa absorbedora hacia los alrededores.

3.4.4. Ductos de entrada y salida del colector

Los ductos son muy importante en el colector solar ya que conducen al aire del ventilador hacia el interior de colector y permite medir la velocidad y temperatura en los puntos de entrada y salida del colector. El diámetro se selecciona previo a los requerimientos de velocidad y flujo de masa del aire que necesita el colector.

El diámetro de entrada al colector se elige de acuerdo al flujo másico del aire necesario en el colector, esta de acorde a las turbinas del ventilador centrífugo donde su diámetro se obtine aplicando la ecuación 3.1. Siendo de 11 cm, lo cual es recomendado en investigaciones anterior en construcciones de colectores solares de placa plana.

$$\dot{m} = \frac{\pi}{4} * d^2 * \rho * v$$

$$d = \sqrt{\frac{0,044 \frac{kg}{s}}{0,785 * 1,16 \frac{kg}{m^3} * 4 \frac{m}{s}}} = 0,1099 = 0,11m$$
(EC.3.10)

Los ductos se construyeron con las plancha galvanizada de 1/20 pulg.

3.5. BALANCE ENERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA TIRO FORZADO.

El balance energético hace referencia al equilibrio entre la energía útil y la energía consumida durante cierto periodo, de forma general se denota con la expresión del balance

Energia Captada = Energía Utilizada + Perdidas de energia (EC.3.11)

La ecuación 3.11 corresponde a la Primera Ley de la Termodinámica, también conocida como Ley de la Conservación de la Energía. La ecuación del balance de la energía permite determinar la relación que tiene la energía proporcionada y el gasto energético en un proceso.

Dentro del estudio de los colectores solares y sus diferentes variaciones de diseño, en donde son criterio del constructor parámetros como área, materiales, velocidades y demás variables que tienen por objetivo alcanzar el mejor desempeño posible.

La energía incidente en el absorbedor, se obtiene teniendo en cuenta la disminución de energía al entrar en contacto con las barreras, dicha perdida está presente en la radiación incidente y las pérdidas ópticas, es decir dependerá del coeficiente de transmisibilidad óptica que posee el vidrio y la absorbancia de la placa receptora.



Figura 3.11. Transmisibilidad de la placa de recepción y efecto de absorbancia de la placa absorbedora Fuente: Elaboración Propia

3.5.1. Calor incidente en la Placa

De esta forma el calor útil que llegará al absorbedor está vinculado al rendimiento óptico del colector (τ_{α}), determinándose como:

$$O_{flujo} = (\tau_{\alpha})I_{ST} \tag{EC.3.12}$$

$$O_{flujo} = \eta_o I_{ST} \tag{EC.3.13}$$

Donde:

 Q_f = Flujo de radiación del absorbedor, W/m²

 τ = Transmitancia de la cubierta,

 α = Absorbancia de la placa, %

 I_{ST} = Radiación solar incidente, W/m²

 η_o = Rendimiento óptico del colector, %

El rendimiento óptico (τ_{α}) está ligado con el ángulo de incidencia de los rayos solares, aunque la variación es muy pequeña. Cabe señalar que cuando los rayos solares inciden perpendicularmente sobre la placa receptora, el valor de (I_{st}) alcanza su máximo valor.

3.5.2. Calor Transmitido de la Placa Absorbedora al Fluido

El valor de energía útil captada por el fluido de trabajo se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_{util} = \dot{m}C_p(T_{salida} - T_{entrd}) \tag{EC.3.14}$$

Donde \dot{m} , C_p , T_{entrd} y T_{salida} representa la tasa de flujo de masa y el calor específico del fluido de trabajo, la temperatura de entrada del fluido y temperatura de salida del fluido. Esta ecuación hace referencia a la transferencia de calor de la placa absorbedora del colector hacia el fluido de trabajo, sin embargo no permite observar los efectos de ciertos parámetros como los coeficientes de pérdidas de calor y la eficiencia óptica.

Empleando la ecuación de Hottel-Whillier (Chamoli, 2013), y teniendo en cuenta los elementos señalados, la potencia útil se denominará, como:

$$Q_{util} = A_{placa} F_R [O_{flujo} - U_{colec} (T_{entrd} - T_{amb})]$$
(EC.3.15)

3.5.3. Factor de remoción de calor.

El factor de remoción de calor del colector, se obtiene mediante la expresión:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_{placa}U_{colec}} \left[1 - exp\left(\frac{F'U_{colec}A_{placa}}{\dot{m}C_p}\right) \right]$$
(EC.3.16)

Dónde:

 Q_{util} = potencia útil de la energía que llega al colector, W A_{placa} , = área de la placa absorbedora del colector, m² F_R = factor de remoción de calor. F' = factor de eficiencia del colector. U_{col} , = coeficiente de pérdidas de calor del colector, W/m² K T_{amb} = temperatura ambiente, °K.

3.5.4. Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de pérdidas de calor en el colector solar de placa plana, U_{colec} se compone de tres partes para su obtención, estas son: la pérdida de calor desde la parte superior, posterior y frontal del colector. Conforme a investigaciones de estudios previos y especificaciones del colector, el tercer término se supone despreciable, dado a que su valor es relativamente pequeño. De tal forma que, el coeficiente de pérdida de calor en general se apoya en la pérdida de calor desde la parte superior de la placa, U_{sup} así como la pérdida de calor de la parte posterior de la placa, U_{post} , lo que se muestra en la ecuación 3.17

$$U_{colec} = U_{sup} + U_{post} \tag{EC.3.17}$$

Para ello debemos de conocer el U_{colec} que representa las pérdidas totales de calor del colector para ellos nos contamos con una referencia (Figura 3.12) que nos permite observar la disposición de las resistencias.



Figura 3.12. Diagrama de Resistencias del colector Fuente: Elaboración Propia

$$U_{f0} = \frac{1}{R_1 + R_0} \tag{EC.3.18}$$

Siendo el valor de R_0 próximo a 0, la expresión queda de la siguiente manera

$$U_{f0} = \frac{1}{R_1} = \frac{K1}{L}$$
(EC.3.19)

Donde K1 la conductividad térmica del Poliestireno (aislante) y L su espesor.

Las pérdidas generadas en la parte superior del colector como se muestran en la (figura 3.13) son R_2 y R_3 , las cuales son la cubierta con su manifestación convección y radiación en forma paralela y el calor de la plancha al fluido a su vez se define como:

$$U_{sup} = \frac{1}{R_2 + R_3} \tag{EC. 3.20}$$

Donde:

$$R_2 = \frac{T_{placa} - T_{cristal}}{(h_c + h_r)(T_{placa} - T_{cristal})}$$
(EC.3.21)

 R_2 representa la resistencia térmica entre la placa absorbente y la cubierta, hc el coeficiente de convención, T_{placa} y $Tc_{cristal}$ son las temperaturas obtenidas con el termómetro digital durante la experimentación, donde el valor de coeficiente de transferencia de calor por radiación (hr) se encuentra regido bajo la siguiente expresión:

$$h_r = \frac{\sigma (T_{placa} + T_{cristal}) (T_{placa}^2 + T_{cristal}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}$$
(EC. 3.22)

R3 representa la resistencia entre la cubierta exterior y el ambiente

$$R_3 = \frac{T_{cristal} - T_{amb}}{(h_c + h_r)(T_{cristal} - T_{amb})}$$
(EC.3.23)

Donde:

$$h_c = \sigma \varepsilon_c (T_{cristal} + T_{amb}) (T_{cristal}^2 + T_{amb}^2)$$
(EC.3.24)

Aplicando las consideraciones de trabajos anteriores los cuales aplican el modelo de Hottel y Wertz para el cálculo de la conductancia superior, para placas con 25° a 225° C con margen de error de $\pm 0.3 W/m^2$.

$$U_{sup} = \left(\frac{N}{\left(\frac{C}{T_{placa}}\right)\left(\frac{T_{placa} - T_{amb}}{N+f}\right)^{e}} + \frac{1}{h_{v}}\right)^{-1}$$
(EC. 3.25)
$$+\frac{\sigma(T_{placa} + T_{amb})(T_{placa}^{2} + T_{amb}^{2})}{\left[\varepsilon_{p} + 0.00591Nh_{v}\right]^{-1} + \frac{2N + f - 1}{\varepsilon_{c}} - N}$$

Donde:

$$h_{v} = 5,7 + 3,8 v_{v}$$

$$f = (1 - 0,04h_{v} + 0,0005h_{v}^{2})(1 + 0,058N)$$

$$C = 520(1 - 0,000051\beta^{2}) \text{ para } 0^{\circ} < \beta < 70^{\circ}$$

$$e = 0,43 \left(1 - \frac{100}{T_{placa}}\right)$$

Siendo:

N = Número de cubiertas

- h_v = Coeficiente convectivo entre la placa de absorción y el aire
- f = Factor de fricción de Darcy-Weisbach
- C = Coeficiente de captación de radiación
- β = Ángulo del colector
- e = Variación de Temperatura de absorbedor de Hottel y Wertz
Conductancia en la parte lateral.

$$U_{lat} = K_a h \frac{P}{lA_c} \tag{EC.3.26}$$

Donde el Ka representa la conductividad del aislante lateral, h un factor de perdida establecido en 6 w/m²K para colectores de un solo cristal, P el perímetro del área de incidencia y A el área neta efectiva.

3.5.5. Eficiencia energética del colector solar.

Posteriormente obtener la eficiencia energética del colector mediante la siguiente expresión:

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}u}{A_{placa}I_{ST}} \tag{EC.3.27}$$

Remplazando la ecuación 3.14 en la ecuación 3.27, tenemos la siguiente ecuación:

$$\eta_t = \frac{\dot{m}C_p(T_{sald} - T_{entrd})}{A_p I_{sT}} \tag{EC.3.28}$$

3.5.6. Recta de normalización.

Entre los organismos internacionales que han establecido procedimientos de normalización el ASHRAE es el de mayor prestigio. La función que determina los rendimientos de un colector comercial se determina mediante un procedimiento experimental denominado proceso de normalización. El método consiste en exponer el colector a la acción de la radiación solar y medir el calor transferido al fluido térmico.

También se mide el caudal de fluido térmico, conocer su calor específico y las temperaturas de entrada y salida del colector, y es preciso medir también la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del viento.

$$q_u = m * c_p * (t_{eco} - t_{sco}) * \Delta T$$
 (EC.3.29)

Donde:

 t_{eco} = Temperatura de entrada del colector

 t_{sco} = Temperatura de Salida del colector

 $\Delta T = Gradiente de temperatura$

 q_u = Calor transferido al fluido

El procedimiento se realiza en condiciones de régimen casi permanente en horas del media día, entre las 11h00 y 13h00, ya que en este periodo la radiación es casi constante. Se hacen medidas simétricas para minimizar el efecto del calor almacenado en el colector, y el colector se orienta hacia el Sur en 16°. El aire debe estar casi en calma, se considera que U_{colec} , $F' y F_R$ son constantes, aunque esto no es estrictamente verás, ya que dependerá siempre de las propiedades físicas del fluido, las cuales a su vez están en dependencia de la temperatura.

Como es difícil conservar constante la temperatura de entrada, la radiación solar, la velocidad del viento y además los coeficientes de transferencia de calor no son constantes, en cada cadena de medidas hay que obtener un aglomerado de puntos. La normalización se completa variando la temperatura de entrada en el colector en todo el rango de temperaturas de trabajo del colector y calculando el rendimiento en cada una de ellas. El resultado es una nube de puntos por la cual se hace pasar una recta, la recta de normalización.



Figura 3.13 Recta de normalización Fuente: Google

En el eje de ordenadas se representa el rendimiento instantáneo n, y en el eje de abscisas el incremento de temperatura medio entre la irradiación solar incidente $\frac{T_{mf}-\Delta T_m}{G_t}$.

La pendiente negativa de esta recta son las pérdidas por transferencia de calor, representadas por el producto del Factor de eficiencia y el Coeficiente global $-F^{'} * U_{colec}$.

Se obtiene la curva de normalización mediante la teoría de Dukle, y se establece una dependencia lineal de temperatura en función del coeficiente de perdida en la ecuación 3.30.

$$F'U_{colec} = a + b(T - T_{amb}) \tag{EC.3.30}$$

Resultando la ecuación de rendimiento instantáneo:

$$n_i = F'(\alpha \tau) - a \frac{\Delta t_m}{G_T} - b \frac{\Delta t_m^2}{G_T}$$
(EC.3.31)

Donde:

 $F'(\alpha \tau)$ =Rendimiento óptico del colector, %

a y b =Coeficiente de pérdida, depende del colector

$$\Delta T_m = T_{mf} - T_{amb}$$

 T_{mf} =Temperatura media del fluido, °K

 T_{amb} =Temperatura ambiente, °K

3.6. BALANCE EXERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

La exergía se define como la cantidad máxima de trabajo útil que puede ser producido por un sistema antes de llegar a un equilibrio con el entorno de referencia. El balance de exergía es un método de análisis muy útil a la hora de valorar el rendimiento energético de un colector solar, nos da una visión más amplia que el rendimiento térmico. Permite valorar las pérdidas de energía en un proceso, la energía que sería aprovechable de flujos salientes en sistemas abiertos y las ventajas de métodos regenerativos en instalaciones térmicas. (Colombia, 2011). De forma general se entiende por balance de exergía en sistemas abiertos (flujo de masa), a la relación de exergía asociada a una corriente material que atraviesa un volumen de control determinado. Adaptando la expresión y utilizando magnitudes específicas

El balance de exergía aplicado a colectores solares se presenta de la siguiente forma:

$$\sum \dot{E} x_{entrd} - \sum \dot{E} x_{salid} = \sum \dot{E} x_{destru.}$$
(EC.3.32)

Donde:

 $\dot{E}x_{entrd}$ = Tasa de exergía de entrada, KW

 $\dot{E}x_{salid}$ = Tasa de Exergía de salida, KW

 $\dot{E}x_{destru} = Exergía destruida, KW$

La tasa de exergía de entrada al colector incluye la exergía del calor absorbido del sol y la exergía del fluido de entrada. La exergía de salida del colector es la misma que la exergía del fluido de salida. Entonces la diferencia entre los dos componentes mencionados representa la cantidad de exergía destruida en el colector (Farzad, 2013).

La tasa de exergía del fluido de trabajo se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$\dot{E}x_f = \dot{m}C_p \left[\left(T_{fluido} - T_{amb} \right) - T_{amb} l_n \left(\frac{T_{fluido}}{T_a m b} \right) \right]$$
(EC.3.33)

La diferencia entre las exergías del fluido a la salida y entrada del colector representa el incremento del flujo de exergía del mismo:

$$\dot{E}x_{fsalida} - \dot{E}x_{fentrd} = \dot{m}C_p \left[\left(T_{fsalida} - T_{fentrd} \right) - T_{amb} l_n \left(\frac{T_{fsalida}}{T_{fentrd}} \right) \right] \quad (EC.3.34)$$

En su mayor parte la exergía de entrada al sistema por la radiación solar es captada y absorbida por la placa negra. La cantidad existente de exergía en una transferencia de calor cuando Q_v es la tasa de transferencia de calor, T_0 es la temperatura de la fuente de exergía y T_{amb} es la temperatura ambiente, se obtiene por:

$$\dot{E}x_{calor} = Q_{\nu} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_0} \right) \tag{EC.3.35}$$

De esta manera se puede calcular la cantidad de exergía de la radiación solar (Petela, 1964), con la ecuación 3.36

$$\dot{E}x_{rad} = A_{placa}I_{ST} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right)^4 \right]$$
(EC. 3.36)

De donde T_{sl} representa la temperatura del sol, al que se considera como cuerpo negro.

La exergía absorbida por la placa de absorción del colector solar plano se calcula con la ecuación 3.37

$$\dot{E}x_{abs.} = \eta_o A_{placa} I_{ST} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{placa}} \right)$$
(EC.3.37)

Siendo T_{placa} es la temperatura media de la placa absorbedora.

Para el cálculo de la destrucción de la exergía debe considerarse que el proceso de transferencia de calor del sol para el fluido de trabajo del colector se compone de dos partes principales, la absorción de la radiación solar por la placa absorbedora y la transferencia de calor de la placa de absorción al fluido de trabajo. Las destrucciones de exergía se producen durante estos dos procesos (Suzuki, 1988). Además se deben considerar las pérdidas de exergía debido a las pérdidas de calor del colector.

3.8.1. Destrucción de exergía del colector solar de placa plana

La destrucción de la exergía en el proceso de absorción es debido a la diferencia de temperatura entre la placa absorbedora y la temperatura aparente de la radiación solar.

$$\dot{E}x_{dest.s-p} = A_{placa}I_T \left[1 - \eta_o + \eta_o \frac{T_{amb}}{T_{placa}} - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right)^4 \right]$$
(EC. 3.38)

Donde:

 T_{sl} = Temperatura del sol, °K

 T_{amb} = Temperatura ambiente, °K

La segunda parte de la destrucción de exergía es debido al proceso de transferencia de calor de la placa de absorción al fluido de trabajo (Pita, 2016).La exergía transferida de la placa de absorción para el fluido de trabajo se obtiene a partir de:

$$\dot{E}x_{p-f} = \dot{m}C_p \left[\left(T_{fsalida} - T_{fentrd} \right) \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{placa}} \right) \right]$$
(EC. 3.39)

La pérdida de calor desde la placa absorbedora hacia los alrededores, se obtiene por:

$$Q_{alr_{plac}} = U_{colec} A_{placa} (T_{placa} - T_{amb})$$
(EC. 3.40)

La destrucción de la exergía debido a las pérdidas de calor del colector se obtiene por:

$$\dot{E}x_{dest.alrr} = U_{colec}A_{placa}\left(T_{placa} - T_{amb}\right)\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{placa}}\right)$$
(EC.3.41)

La tasa de exergía destruida en el proceso de transferencia de calor desde la placa absorbedora al fluido de trabajo se obtiene con la ecuación 3.42

$$\dot{E}x_{dest.p-f} = \dot{m}C_p T_{amb} \left[\left(ln \frac{T_{fsalida}}{T_{fentrd}} \right) - \frac{T_{fsalida} - T_{fentrd}}{T_{placa}} \right]$$
(EC.3.42)

Donde:

 T_{fentrd} = Temperatura del fluido de entrada, °K

- $T_{fsalida}$ = Temperatura del fluido de salida, °K
- T_{placa} = Temperatura de la placa absorbedora, °K
- T_{amb} = Temperatura ambiente, °K
- \dot{m} = Flujo másico, kg/s

La eficiencia exergética del colector se obtiene mediante la relación del flujo de exergía al fluido de trabajo para el total de la exergía de entrada proveniente de la radiación solar (Farzad, 2013).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}C_p \left[\left(T_{fsalida} - T_{fentrd} \right) - T_{amb} * l_n \left(\frac{T_{fsalida}}{T_{fentrd}} \right) \right]}{A_{placa} I_{ST} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right)^4 \right]}$$
(EC. 3.43)

Donde:

 A_{placa} = Área de la placa absorbedora, m²

 I_{ST} = Radiación Solar, W/m²

CAPITULO IV.

4. DESARROLLO DEL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

4.1. Descripción de las variables a considerar en la toma de datos del colector.

Dentro del colector solar ocurren procesos termodinámicos, de transferencia de calor, el monitoreo de las variables como velocidad de entrada y salida del aire del colector, temperatura inicial y final del aire, y las condiciones climatológicas, permite evaluar el comportamiento energético y exergético del colector, con la cual podemos determinar los rendimientos energéticos y exergéticos así como también la destrucción de la exergía

Al modificar la velocidad de entrada del aire al colector nos permite cambiar parámetros como el flujo másico y la transferencia de calor placa-fluido, de esta manera se determina la destrucción de la exergía para diferentes condiciones de operación, igual ocurre al modificar las variables ambientales.

Dentro del diseño del colector se contemplaron accesos en la entrada y salida de aire para toma de datos de velocidades y temperaturas como se observa en la figura 4.1.



Figura 4.1. Colector Solar de Placa Plana tiro forzado

4.1.1. Instrumentos de Medida.

4.1.1.1 Anemómetro HYELEC MS6252B.

El anemómetro es un dispositivo ampliamente utilizado en las estaciones climatológicas como herramienta de precisión para estimar condiciones ambientales, sirve básicamente para la toma los siguientes de datos:

- Velocidad del aire, (m/s),(km/h),(ft/s),(mil/h)
- Humedad Relativa, (%)
- Temperatura del aire, (°C)

Dentro de las principales generalidades del equipo tenemos:

- Altura Máxima de Trabajo, 2000 metros sobre nivel del mar
- Pantalla LCD
- Muestreo, 0,4/s

Entorno de funcionamiento del detector (ventilador).

- Humedad Relativa 0 95 % RH
- Temperatura, (-20 °C) a (80 °C)

Para la obtención de los datos tomados con el dispositivo, se la realiza mediante la herramienta informática Anemometer FormView, la cual es un entorno virtual que permite al usuario visualizar y descargar información como:

- N_O, (Numero de muestras)
- T&RH, (Temperatura y Humedad Relativa)
- DATA, (Fecha)

- UNIT, (Unidad de medida)
- TIME, (Hora)

En la figura 4.2 se presenta la apariencia del entorno virtual del software de adquisición de datos.



Figura 4.2. Interface del entorno virtual Fuente: Software Anemometer FormView

En la figura 4.3 se presenta la caracterización del Anemometro de marca HYELEC

utilizado para la toma de datos en la presente investigación.



Figura 4.3. Anemómetro HYELEC MS6252B Fuente: Google

4.1.1.2. Piranómetro (Solarimetro)

Es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (kilovatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados. (Wikipedia, 2016).

Para la medición del espectro de la radiación solar, se debe conocer que éste se extiende entre 300 y 2800nm. Esto indica que un piranómetro (sensor de radiación solar) debe cubrir ese espectro con una sensibilidad lo más plana posible.

Para medir una radiación solar, se requiere que la respuesta al flujo de radiación varíe con el coseno de ángulos de incidencia; por ejemplo, se obtiene máxima respuesta cuando el flujo incide perpendicularmente sobre el sensor (0 grados), respuesta nula cuando el sol está en el horizonte (90 grados), obteniéndose valores intermedios de respuesta cuando el ángulo de incidencia está entre los anteriores.

4.1.1.2.1. Componentes principales.

Los componentes principales del pirómetro son el circuito impreso, sensor o termopila, cúpula de cristal, cuerpo de metal, abrazadera del cable, cable eléctrico de salida de señal, tornillo de nivelado, base de goma, cápsula, bornes de conexión para los cables, nivel.

La termopila, formada por sectores blancos y negros, es capaz de absorber la radiación solar en un rango entre los 300 y los 50000 nm. y tiene una respuesta casi perfecta al coseno del ángulo de incidencia.

La cúpula de cristal limita la respuesta al rango de 300 a 2800 nm. preservando un campo de visión de 180 grados. Otra función de la cúpula es la de proteger la termopila de la convección.

Las bandas negras del sensor (termopila) absorben la radiación solar que se transforma en calor. Este calor fluye atravesando los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, proporcionando una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente (ecured, 2016).

Al piranómetro se adjunta un certificado con los siguientes datos:

- Sensibilidad del piranómetro (K) en mV por kW m2
- Resistencia de la termobatería (R) en Ω
- Tiempo de inercia en seg.
- Tabla del factor de corrección por la altura del sol (Fh).



Figura 4.4. Pirómetro del tipo M-80-M (M-115-M) Fuente: (ecured, 2016)

4.1.1.3. Pirómetro PCE-889B (Termómetro Digital)

El pirómetro es un medidor de temperatura sin contacto. El rayo láser proyecta unos puntos muy claros, lo que facilita la medición de temperatura a distancia. La buena relación entre la distancia y el punto de medición permite al usuario medir desde un punto seguro (International, 2017).

Sus características son:

- Óptica de 30:1
- Rango: -50 ... +1000 °C
- Indicación del valor máximo

En la tabla 4.1 se detallan los parámetros técnicos del equipo.

ESPECIFICACIONES TI	ÉCNICAS
Rango	-50+1000°C
Resolución	0,1 °C
Precisión	1%
Tiempo de Respuesta	<150ms
Óptica	30;1
Ajuste de grado de emisividad	0,11,0
Rango Espectral	0,814
Dimenciones	146 x 104 x 43 mm
Peso	163 g
Unidades de temperatura	°C / °F
Funciones de pantalla	Función Hold, indicador de valor máximo
Iluminación de fondo	Si
Indicador al sobrepasar el valor límite	Si
Función de medición continua	Si
Alarma	Si
Alimentación	1 x pila de 9 vol.

Tabla 4.1. Especificaciones técnicas de Pirómetro PCE-889B Fuente: (International, 2017)



Figura 4.5. Pirómetro PCE-889B Fuente: Google

4.1.2. Descripción de las mediciones.

Para la medición de la velocidad del aire se procedió colocar el anemómetro HYELEC MS6252B en la sección de entrada del fluido, luego se puso en marcha al ventilador para la toma de datos en sus diferentes velocidades durante una hora determinada.

En la tabla 4.2. Se detallan los valores obtenidos a la entrada y salida del aire en el colector, para efecto se impulsa el aire mediante un ventilador con una turbina de 24 cm de diámetro y para una densidad de aire de 1,16 kg/m³, la toma de datos se efectuó el 7 de diciembre del 2016.

HORA	RADIACIÓN W/m ²	T _{entrd} °C	T _{sal} °C	V _{entrad} m/s	FLUJO DE MASA Kg/s	V _{sald} m/s	T _{placa} °C
11:00	648,43	30,0	41	4,05	0,04464	2,05	66,35
11:30	654,00	30,0	42	4,19	0,04618	2,20	69,42
12:00	659,00	31,0	44	4,15	0,04574	2,22	72,42
12:30	661,08	31,5	47	4,30	0,04740	2,25	78,12
13:00	662,00	32,0	53	4,00	0,04409	2,30	82,46

Tabla 4.2. Valores resultantes de la experimentación Fuente: Autores del Trabajo de investigación

En la figura 4.6 se presenta la gráfica generada por la herramienta virtual Anemometer FormView, referente a las velocidades de ingreso al colector solar, en la gráfica los ejes de coordenadas abscisas y ordenadas representan el número de interacciones y la velocidad respectivamente.



Figura 4.6. Gráfica Velocidad vs Interacciones de la prueba 1 Fuente: Software de anemómetro HYELEC MS6252B

En la tabla 4.3. Se presentan los datos de entrada y salida de aire del colector obtenidos el 8 de diciembre del 2016 utilizando el ventilador con una turbina de 26 cm de diámetro y con una densidad de aire de $1,16 \text{ kg/m}^3$

HORA	RADIACIÓN W/m ²	T _{entrd} °C	T _{sal} °C	V _{entrd} m/s	V _{sald} m/s	FLUJO DE MASA Kg/s	T _{placa}
11:00	659,40	30,0	42,3	7,1	4,8	0,07826	67,56
11:30	663,20	30,0	42,8	6,8	4,7	0,07496	69,42
12:00	672,08	31,0	43,2	6,4	4,4	0,07055	72,82
12:30	672,11	31,5	44,0	6,25	4,3	0,06889	74,12
13:00	672,15	32,0	45,7	6,1	3,9	0,06724	79,46

Tabla 4.3. Valores resultantes de la experimentación Fuente: Fuente: Autores del Trabajo de investigación

En la figura 4.7 se presenta una gráfica generada por la herramienta virtual Anemometer FormView, referente a las velocidades de ingreso al colector solar en la prueba 2, en la gráfica los ejes de coordenadas abscisas y ordenadas representan el número de interacciones y la velocidad respectivamente.



Figura 4.7. Gráfica Velocidad vs Interacciones de la prueba 2. Fuente: Software de anemómetro HYELEC MS6252B

En la tabla 4.4 se muestran los valores obtenidos el día 9 de diciembre del 2016, referentes a los valores de entrada y salida de aire del colector con una densidad de $1,16 \text{ kg/m}^3$, dichos datos fueron obtenidos en el ventilador con una la turbina de 24 cm de diámetro.

HORA	RADIACIÓN W/m ²	T _{entrd} °C	T _{sal} °C	V _{entrd} m/s	FLUJO DE MASA Kg/s	V _{sald} m/s)	T _{placa}
11:00	517,77	30,0	42,7	4,30	0,04740	2,55	59,50
11:30	518,08	30,0	47,2	4,22	0,04652	2,50	61,42
12:00	518,96	31,0	49,0	3,80	0,04189	2,30	63,76
12:30	519,09	31,0	50,4	3,46	0,03814	2,26	64,32
13:00	519,66	31,5	51,3	3,20	0,03527	2,18	64,56

Tabla 4.4. Valores obtenidos de la experimentación Fuente: Autores del Trabajo de investigación

En la gráfica 4.8 se presenta la interface gráfica del software Anemometer FormView, referente a la prueba 3, se muestran parámetros como la temperatura de ingreso al colector y la velocidad



Figura 4.8. Interface de Software de parámetros medidos en la prueba 3 Fuente: Software de anemómetro HYELEC MS6252B

En la tabla 4.5 se muestran los valores obtenidos el día 15 de diciembre del 2016 referentes a los valores de entrada de aire al colector con una densidad de 1,16 kg/m³, dichos datos fueron obtenidos en el ventilador utilizando la turbina de 26 cm.

HORA	RADIACIÓN W/m ²	T _{entrd} °C	T _{sal} °C	V _{entrd} m/s	FLUJO DE MASA (Kg/s)	V _{sald} m/s	T _{placa} °C
11:00	551,94	30,0	42,0	6,8	0,07496	4,7	63,45
11:30	553,30	30,0	42,0	6,5	0,07496	4,5	64,20
12.00	554,04	31,0	42,8	6,3	0,06945	4,4	65,36
12:30	553,50	31,0	43,2	6,0	0,06614	4,2	68,46
13:00	553,25	31,5	44,7	5,8	0,06393	3,8	65,12

Tabla 4.5. Resultados de la toma de datos del colector Fuente: Autores del Trabajo de investigación



Figura 4.9. Gráfica Velocidad vs Interacciones de la prueba 4. Fuente: Software de anemómetro HYELEC MS6252B

En la tabla 4,6 se presentan los valores de entrada y salida del aire, obtenidos de forma experimental en el colector solar de placa plana el 02 de febrero del 2017, utilizando la turbina de 24 cm de diámetro del ventilador centrifugo con una densidad de aire de 1,16 kg/m³.

HORA	RADIACIÓN W/m ²	T _{entrd} °C	T _{sal} °C	V _{entrd} m/s	FLUJO DE MASA (Kg/s)	V _{sald} m/s	T _{placa} °C
11:00	840,50	30,0	48,0	4,05	0,04464	2,05	81,75
11:30	843,45	30,0	51,6	4,19	0,04618	2,20	78,33
12.00	852,00	31,0	54,2	4,15	0,04574	2,22	111,66
12:30	855,30	31,0	55,4	4,30	0,04740	2,25	115,66
13:00	856,06	31,5	58,3	4,00	0,04409	2,30	114,50

Tabla 4.6. Valores resultantes de la experimentación Fuente: Fuente: Autores del Trabajo de investigación

4.1.3. Procesamiento estadístico de los resultados.

Para el procesamiento de los resultados obtenidos tras la medición, se utilizó el programa ANEMOMETER FORMVIEW, realizaron diversas comparaciones de las variables de interés, en función de encontrar las variaciones entre diferentes puntos de referencia.

En la figura 4.9. se presenta la manera en la cual el software muestra al investigador los parámetros medidos



Figura 4.9. Interface de Software de parámetros medidos en la prueba 4 Fuente: Software de anemómetro HYELEC MS6252B

En el procesamiento de los datos se realizó una comparación de los valores más repetitivos en una muestra de 100 mediciones anotados en las tablas anteriores, éstos se promediaron para obtener el comportamiento de las variables térmicas y climáticas, dando como resultado los valores mostrados en la tabla 4.7, para determinar la temperatura media de la placa se realiza con la cámara térmica de marca FLIR, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UTM.

En la siguiente tabla se presenta los valores promedios de los datos obtenidos con la turbina de 26 cm del ventilador centrifugo con una densidad de aire de $1,16 \text{ kg/m}^3$

Homo	Ist	Tentrd	Tamb	Tsal	V.Entrd.	F.Másico	V.Sald	T.Placa	Tcubiert
пога	W/m^2	°C	°C	°C	m/s	Kg/s	m/s	°C	°C
11:00	605,67	31,0	30	42,15	6,95	0,07661	4,75	65,505	40,52
11:30	608,25	32,0	30	42,4	6,65	0,07496	4,6	66,81	42,60
12:00	613,06	32,5	30	43,0	6,35	0,07007	4,4	69,09	45,90
12:30	612,80	33,0	31	43,6	6,125	0,06751	4,25	71,29	52,36
13:00	612,70	33,0	31,5	45,2	5,95	0,06558	3,85	72,29	55,26

Tabla 4.7. Valores promedios de la experimentación Fuente: Autores del Trabajo de investigación.

En la siguiente tabla se presenta los valores promedios de los datos obtenidos con la turbina de 24 cm del ventilador centrifugo con una densidad de aire de $1,16 \text{ kg/m}^3$

Homo	Ist.	Tentrd	Tamb	Tsal	V.Entrd.	F.Másico	V.Sald.	T.Placa	Tcubiert.
пога	W/m^2	°C	°C	°C	m/s	Kg/s	m/s	°C	°C
11:00	668,90	31,0	30,0	43,90	4,17	0,04602	2,30	69,20	42,22
11:30	671,84	32,0	30,0	46,93	4,20	0,04635	2,35	69,72	46,16
12:00	676,65	32,5	31,0	49,06	3,97	0,04381	2,26	82,61	58,01
12:30	678,49	33,0	31,0	50,93	3,88	0,04277	2,25	86,03	56,56
13:00	679,24	33,0	31,5	54,20	3,52	0,03308	2,24	87,17	61,92

Tabla 4.8. Valores promedios de la experimentación Fuente: Autores del Trabajo de investigación.

Para el cálculo se utilizaran los valores promedios de la 13H00, de la tabla 4.7, en donde la radiación promedio y la temperatura de salida son más altos.

4.2. BALANCE ENERGÉTICO DEL COLECTOR SOLAR.

4.2.1. Calor incidente en la Placa Absorbedora



El colector solar de placa plana de tiro forzado cuenta con una orientación de 17º en dirección norte, este parámetro es de vital importancia ya que permite que los rayos solares incidan perpendicularmente sobre el colector.

El valor de la radiación media en Portoviejo I_{ST} se obtuvo de la herramienta virtual de la NASA Surface meteorology and Solar Energy, la cual brinda un valor promediado entre 1996 – 2016. Los valores se presentan en la tabla 4.9.

	Fuente: (NASA, 2017)											
Promedio mensual de radiación solar incidente en una superficie horizontal												
kW/m ²												
Lat1,04	Ene.	Fbr.	Mar.	Abr.	May	Jun.	Julio	Agt.	Spt.	Oct.	Nov.	Dic.
Long80,45												
Prom.	Prom. 0,73 0,70 0,77 0,76 0,69 0,56 0,49 0,51 0,60 0,62 0,62 0,71											0,71

Tabla 4.9 Promedio de Radiación incidente en Portoviejo

Para determinar la cantidad de calor incidente en la placa absorbedora se aplica la ecuación (EC.3.13)

Datos:

 $\tau = 0,916$

 $\alpha = 0,92$

 $I_{ST} = 679,29 \text{ W/m}^2$

$$O_{flujo} = (\tau_{\alpha})I_{ST}$$

 $O_{flujo} = (0,846) * 679,29 \frac{W}{m^2}$

$$O_{flujo} = 574,67 \frac{W}{m^2}$$

4.2.2. Cálculo del coeficiente de pérdidas.

4.2.2.1. Perdidas de Fondo

Datos:

$$K_1 = 0,024 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$$

L = 0.05 m

$$U_{f0} = \frac{1}{R_1 + R_0}$$

Siendo el valor de R_0 próximo a 0, la expresión queda de la siguiente manera

$$U_{f0} = \frac{1}{R_1} = \frac{K1}{L} = \frac{0.024 \frac{W}{mK}}{0.05m} = 0.48 \frac{W}{m^2 K}$$

4.2.1.2. Conductividad Superior.

$$U_{sup} = \frac{1}{R_2 + R_3}$$

Donde:

 $\sigma = 5,6697 \text{ x} 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$ $T_{\text{placa}} = 360,17 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $T_{\text{cubierta}} = 334,92 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $\varepsilon_p = 0,97$ $\varepsilon_c = 0,88$

$$R_2 = \frac{T_{placa} - T_{cristal}}{(h_c + h_r)(T_{placa} - T_{cristal})}$$

$$h_r = \frac{\sigma(T_{placa} + T_{cristal})(T_{placa}^2 + T_{cristal}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}$$
$$h_r = \frac{\frac{5,6697x10^{-8}W}{m^2K^4}(360,17 + 334,92)(360,17^2 + 334,92^2)}{\frac{1}{0,97} + \frac{1}{0,88} - 1} = 8,16\frac{W}{m^2K}$$

R3 representa la resistencia entre la cubierta exterior y el ambiente

$$R_{3} = \frac{T_{cristal} - T_{amb}}{(h_{c} + h_{r})(T_{cristal} - T_{amb})}$$

$$h_{c} = \sigma \varepsilon_{c} (T_{cristal} + T_{amb}) (T_{cristal}^{2} + T_{amb}^{2})$$

$$h_{c} = 5,6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^{2} K^{4}} (334,92 - 304) (334,92^{2} + 304^{2}) = 0,3586 \frac{W}{m^{2} K}$$

Una vez obtenido el coeficiente hc se procede a la obtención de la resistencia.

$$R_3 = \frac{334,92 - 304}{\left(0,3586\frac{W}{m^2K} + 8,16\frac{W}{m^2K}\right)(334,92 - 304)} = 0,1173 \frac{W}{m^2K}$$

Coeficiente de conductividad en la parte superior

$$U_{sup} = \left(\frac{N}{\left(\frac{C}{T_{placa}}\right)\left(\frac{T_{placa} - T_{amb}}{N + f}\right)^{e}} + \frac{1}{h_{v}}\right)^{-1} + \frac{\sigma(T_{placa} + T_{amb})(T_{placa}^{2} + T_{amb}^{2})}{\left[\varepsilon_{p} + 0.00591Nh_{v}\right]^{-1} + \frac{2N + f - 1}{\varepsilon_{c}} - N}$$

Donde:

N = 1

- $h_v = 10,26$
- f = 0,9232

C = 512,3357

e = 0,3035

$$\begin{split} U_{sup} &= \left(\frac{1}{\left(\frac{512,3357}{360,17}\right)\left(\frac{360,17-304}{1+0,9232}\right)^{0,3035}} + \frac{1}{10,26}\right)^{-1} \\ &+ \frac{5,6697 \times 10^{-8}(360,17+304)(360,17^2+304^2)}{[0,97+0,00591(1)(10,26)]^{-1} + \frac{2(1)+0,9232-1}{0,88} - 1} \\ U_{sup} &= 7,6851\frac{W}{m^2 K} \end{split}$$

4.2.3. Conductancia en la parte lateral

Datos:

$$K_a = 0,029 \text{ W/m}^2 \text{ °K}$$

$$h = 6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$P = 2,4 \text{ m}$$

$$A_c = 1,28 \text{ m}^2$$

$$L = 0,025 \text{ m}$$

$$U_{lat} = K_a h \frac{P}{LA_c}$$

$$U_{lat} = 13,05 \frac{W}{m^2 K}$$

Una vez adquiridos los valores de pérdidas por los costados podemos acudir a la expresión matemática de las pérdidas de calor (EC.3.26)

$$U_l = 21,22 \frac{W}{m^2 K}$$

4.2.4. Calor útil del colector

Aplicando la ecuación 3.15 se obtiene el valor del calor útil transmitido al fluido.

Datos.

$$\begin{split} \dot{m} &= 0,03308 \text{ kg/s} \\ C_p &= 1,007 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{K} \\ Q_{util} &= \dot{m}C_p(T_{salida} - T_{entrd}) \\ Q_{util} &= 0,03308 \frac{kg}{s} * 1,007 \frac{kJ}{kg^{\circ}K} (327,2 - 308)^{\circ}K \\ Q_{util} &= 0,6390 \text{ kW} \end{split}$$

4.2.5. Rendimiento Energético del colector solar.

Datos:

$$T_{salida} = 327,2 \text{ °K}$$

$$T_{entrd} = 308 \text{ °K}$$

$$A_{placa} = 1,28 \text{ m}^2$$

$$I_{ST} = 679,24 \text{ W/m}^2$$

$$\eta_t = \frac{\dot{m}C_p(T_{salida} - T_{entrd})}{A_{placa}I_{ST}}$$

$$\eta_t = \frac{0,03308 \frac{\kappa g}{s} * 1007 \frac{J}{kg^2 K} (327,2 - 308)^{\circ} K}{1,28 m^2 * 679,24 \frac{W}{m^2}} = 74\%$$

4.3. BALANCE EXERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

Los datos utilizados a continuación son promedios obtenidos mediante la experimentación y se encuentran ubicados en la tabla 4,8.

4.3.1. Exergía del Fluido de Trabajo

La tasa de exergía del fluido de trabajo se obtiene de la siguiente ecuación 3.31:

Datos:

$$\begin{split} m &= 0,03308 \text{ kg/s} \\ \text{Cp} &= 1,007 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{K} \\ \text{T}_{\text{fluido}} &= 327,2 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ \text{T}_{\text{amb}} &= 308 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ \dot{E}x_{fluid} &= \dot{m}C_{p} \left[\left(T_{fluido} - T_{amb} \right) - T_{amb} l_{n} \left(\frac{T_{fluido}}{T_{amb}} \right) \right] \\ \dot{E}x_{f} &= 0,03308 \frac{Kg}{seg} * 1,007 \frac{kJul}{Kg \, {}^{\circ}\text{K}} \left[(327,2 \, {}^{\circ}\text{K} - 308 \, {}^{\circ}\text{K}) - 308 \, {}^{\circ}\text{K} * l_{n} \left(\frac{327,2}{308} \right) \right] \end{split}$$

$\dot{E}x_f = 0,01914 \ KW$

4.3.2. Incremento de flujo de exergía en el fluido.

Datos.

= 0,03308 kg/s т Cp = $1,007 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{K}$ $T_{fluido} = 327,2 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $T_{amb} = 306 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $T_{entrd}\ = 308^{o}K$

$$\dot{E}x_{fsalida} - \dot{E}x_{fentrd} = \dot{m}C_p \left[\left(T_{fsalida} - T_{fentrd} \right) - T_{amb}l_n \left(\frac{T_{fsalida}}{T_{fentrd}} \right) \right]$$
$$\dot{E}x_{fsalida} - \dot{E}x_{fentrad}$$

$$= 0,03308 \frac{Kg}{seg} * 1,007 \frac{kJ}{Kg \,{}^{\circ}K} \Big[(327,5 \,{}^{\circ}K - 308 \,{}^{\circ}K) - 306 \,{}^{\circ}K * l_n \left(\frac{327,5}{308}\right) \Big]$$

$$\dot{E}x_{fsalida} - \dot{E}x_{fentrd} = 0,02382 \, KW$$

4.3.3. Tasa de Exergía de la Radiación solar Incidente.

Datos:

$$T_{amb} = 306 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{sl} = 5800 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$A_{placa} = 1,28 \text{ }^{2}$$

$$I_{ST} = 0,67924 \text{ }^{2}\text{ }^{W}\text{/m}^{2}$$

$$\dot{E}x_{rad} = A_{placa}I_{ST}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}}\right)^{4}\right]$$

$$\dot{E}x_{rad} = (1,28m^{2}) * 0,67924 \frac{kW}{m^{2}}\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{306}{5800}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{306}{5800}\right)^{4}\right]$$

$$\dot{E}x_{rad} = 0.8082 \text{ } kW$$

 $Ex_{rad} = 0,8082 \ kW$

4.3.4 Exergía absorbida por la placa de absorción del colector solar plano

Datos:

$$\eta_{o} = 0,843$$

$$A_{placa} = 1,28 \text{ m}^{2}$$

$$I_{st} = 679,24 \text{ W/m}^{2}$$

$$T_{amb} = 306 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{placa} = 360,17 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\dot{E}x_{abs.pl.} = \eta_{o}A_{placa}I_{ST} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{placa}}\right)$$

$$\dot{E}x_{abs.pl.} = 0,843(0,80 * 1,60)m^{2} \left(0,67924 \frac{kW}{m^{2}}\right) \left(1 - \frac{306}{360,17}\right)$$

$$\dot{E}x_{abs.pl.} = 0,1103 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

4.3.5. Destrucción de exergía del colector solar de placa plana

Datos:

$$\begin{split} \eta_o &= 0,843 \\ A_{\text{placa}} &= 1,28 \text{ m}^2 \\ I_{\text{st}} &= 679,24 \text{ W/m}^2 \\ T_{\text{amb}} &= 306 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ T_{\text{placa}} &= 360,17 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ T_{\text{sl}} &= 5800 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ \dot{E}x_{dest.s-p} &= A_{placa}I_{ST} \left(1 - \eta_o + \eta_o \frac{T_{amb}}{T_{placa}} - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}}\right)^4\right) \\ \dot{E}x_{dest.s-p} &= (1,28)m^2 \left(0,67924 \frac{kW}{m^2}\right) \left[1 - 0,843 + 0,843 \left(\frac{306}{360,17}\right) - \frac{4}{3} \left(\frac{306}{5800}\right)^4\right] \\ \dot{E}x_{dest.s-p} &= 0,1689 \text{ } kW \end{split}$$

4.3.6. Pérdida de calor hacia los alrededores del colector.

Datos:

 $U_{colec} = 0,02122 \text{ kW/m}^{2 \text{ o}} \text{K}$

$$A_{placa} = 1,28 \text{ m}^{2}$$

$$T_{placa} = 360,17 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{amb} = 306 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$Q_{alrr} = U_{colec}A_{placa}(T_{placa} - T_{amb})$$

$$Q_{alrr} = 0,02122 \frac{kW}{m^{2} \circ K}(1,28)m^{2}(360,17 - 306)^{\circ}K$$

$$Q_{alrr} = 1,4713 kW$$

4.3.7. Destrucción de la exergía debido a las pérdidas de calor del colector.

Datos:

 $U_{colec} = 0,02122 \text{ kW/m}^{2} \text{ }^{\circ}\text{K}$ $A_{placa} = 1,28 \text{ }^{2}$ $T_{placa} = 360,17 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $T_{amb} = 306 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $\dot{E}x_{dest.alrr} = U_{colec}A_{plca}(T_{placa} - T_{amb})\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{placa}}\right)$ $\dot{E}x_{dest.alrr} = 0,02122 \frac{kW}{m^{2}}(1,28)m^{2}(360,17 - 306)^{\circ}K\left(1 - \frac{306}{360,17}\right)$

 $\dot{E}x_{dest.alrr} = 0,2212 \ kW$

4.3.8. Exergía Transferida de la placa absorbedora al fluido.

Datos:

 $\dot{m} = 0,03308 \text{ kg/s}$ $C_{p} = 1,007 \text{ kJ/kg °K}$ $T_{fsal} = 327,2 °K$ $T_{fentrd} = 308 °K$ $T_{amb} = 306 °K$ $T_{placa} = 360,17$ $\dot{E}x_{p-f} = \dot{m}C_{p} \left[(T_{fsalida} - T_{fentrd}) \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{placa}} \right) \right]$

$$\dot{E}x_{p-f} = 0,03308 \frac{Kg}{seg} * 1,007 \frac{kJul}{Kg \,^{\circ}K} \left[(327,2-308) \left(1 - \frac{306}{360,17} \right) \right]$$

 $\dot{E}x_{p-f} = 0,0964 \ kW$

4.3.9. Exergía destruida en el proceso de transferencia de calor entre la placa absorbedora

y el fluido.

Datos:

$$\begin{split} \dot{m}_{flu} &= 0,03308 \text{ kg/s} \\ C_p &= 1,007 \text{ kJ/kg °K} \\ T_{fsal} &= 327,2 \text{ °K} \\ T_{fentrd} &= 308 \text{ °K} \\ T_{amb} &= 306 \text{ °K} \\ T_{placa} &= 360,17 \\ \dot{E}x_{dest.p-f} &= \dot{m}C_p T_{amb} \left[\left(ln \frac{T_{fsalida}}{T_{fentrd}} \right) - \frac{T_{fsalida} - T_{fentrd}}{T_{placa}} \right] \\ \dot{E}x_{dest.p-f} &= 0,03308 \frac{Kg}{seg} * 1,007 \frac{kJul}{Kg \ ^{\circ}K} * 306 \ ^{\circ}K \left[\left(ln \frac{327,2}{308} \right) - \frac{327,2 - 308}{360,17} \right] \\ \dot{E}x_{dest.p-f} &= 0,03308 \frac{Kg}{seg} * 1,007 \frac{kJul}{Kg \ ^{\circ}K} * 306 \ ^{\circ}K \left[\left(ln \frac{327,2}{308} \right) - \frac{327,2 - 308}{360,17} \right] \end{split}$$

$\dot{E}x_{dest.p-f} = 0,073 \ kW$

4.3.10. Eficiencia exergética del colector solar.

Datos:

$$\dot{m} = 0,03308 \text{ kg/s}$$

$$T_{\text{fsal}} = 327,2 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{\text{fentrd}} = 308 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{\text{amb}} = 306 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{\text{s}} = 5800 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\eta_{exg} = \frac{\dot{m}C_p \left[\left(T_{f.salida} - T_{f.entrd} \right) - T_{amb} l_n \left(\frac{T_{f.salida}}{T_{f.entrd}} \right) \right]}{A_{placa} I_{ST} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sl}} \right)^4 \right]}$$

$$\eta_{ex} = \frac{0,02382 \ kW}{0,8082 \ kW}$$

 $\eta_{ex} = 2,94\%$

A continuación se presenta una tabla de cálculos energéticos y exergéticos, basándose en datos experimentales, monitoreados y adjuntados en las tabla 4,6.

	Cálculos Promedios de valores experimentales con la turbina de 24 cm.													
Hora	Tem. Amb. °K	Temp. Sal. °K	Temp. Entrd °K	V.Entrd. m/s	Radiación W/m ²	Flujo Másico Kg/s	Factor Óptico	η_t	Incremento de Exergía en el fluido kW	η_{ex}	Destrucción de la Exergía del colector kW	Exergía Transferida P-F kW		
11:00	303	316,9	304	4,175	668,9	0,04602	0,843	54	0,008947	1,790	0,69689851	0,06972279		
11:30	303	319,6	305	4,205	671,84	0,04635	0,843	59	0,013256	2,521	0,69996157	0,07947809		
12:00	304	322,06	305,5	3,975	676,65	0,04381	0,843	65	0,016323	2,806	0,70685079	0,08308654		
12:30	304	323,93	306	3,20	678,49	0,03527	0,843	68	0,019986	2,723	0,70877292	0,07242082		
13:00	306	327,2	308	3,60	679,24	0,03308	0,843	74	0,023172	2,866	0,71332654	0,06899281		

Tabla 4.9. Variables térmicas obtenidas el 07 y 09 de diciembre del 2016 y 2 de febrero del 2017 Fuente: Elaborada por los investigadores

Tabla 4.10. Variables térmicas obtenidas el 08 y 15 de diciembre 2016.

Fuente: Elaborada por los investigadores

	Cálculos Promedios de valores experimentales con la turbina de 26 cm.													
Hora	Tem. Amb. °K	Temp. Sal. °K	Temp. Entrd °K	V.Entrd. m/s	Radiación W/m ²	Flujo Másico Kg/s	Factor Óptico	η_t	Incremento de Exergía en el fluido kW	η_{ex}	Destrucción de la Exergía del colector kW	Exergía Transferida P-F kW		
11:00	303	315,1	304	6,95	605,67	0,07661	0,843	42	0,016287	2,520	0,63102186	0,10032017		
11:30	303	315,4	305	6,65	608,25	0,07330	0,843	44	0,016302	2,450	0,63370985	0,08953309		
12:00	303	316,0	305,5	6,35	613,06	0,07000	0,843	51,4	0,017268	2,518	0,63872119	0,08631606		
12:30	304	316,6	305,5	6,12	612,8	0,06752	0,843	57	0,016278	2,306	0,64015099	0,08194928		
13:00	304,5	318,2	307	5,95	612,7	0,06559	0,843	60	0,019091	2,528	0,64089673	0,07562170		

4.3.11. Análisis de los Resultados.

Las siguientes graficas son realizadas con datos de la tabla 4.7 cuyos datos son valores promedios de valores obtenidos experimentalmente del colector solar de placa plana, donde se obtuvieron lo resultados con mayor eficiencia utilizando la turbina de 24 cm para el ventilador centrifugo ya que se encuentra dentro de los parámetros de tolerancia en cuanto a velocidades de entrada se refiere.

Para la aplicación de las ecuaciones se mantuvieron constantes la radiación en $679,24 \text{ W/m}^2$, el área del colector de $1,28 \text{ m}^2$, el rendimiento óptico en 0,843 y la temperatura ambiente 33 °C.

4.3.11.1. Incremento de Exergía del fluido VS Rendimiento energético.

En la figura 4.5 se presenta incremento de exergía del fluido vs rendimiento energético, manteniéndose contantes el flujo másico y la temperatura ambiente.

El incremento de exergía del fluido es directamente proporcional al rendimiento energético, entonces se establece que entre más transferencia de calor haya al fluido el rendimiento aumentaría, esto se consigue variando la variables altura placa absorbedora – cubierta.



Figura 4.5 Ex ganada por el fluido VS Rendimiento Térmico Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.2. Rendimiento exergético vs temperatura ambiente.

En la figura 4.6 se presenta incremento de exergía del fluido vs rendimiento energético, manteniéndose constantes el flujo másico y la temperatura de entrada de aire al colector.

El rendimiento exergético depende directamente de la temperatura ambiente como se puede analizar, que temperatura la ambiente aumenta el rendimiento exegético disminuye, por cual esto establece que un colector solar debe trabajar a temperaturas entre (27°C) a (30°C) para obtener su mejor rendimiento en la ciudad Portoviejo.



Figura 4.6 Rendimiento Exergético VS Temperatura ambiente Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.3. Exergía perdida hacia los alrededores VS Temperatura promedio de la placa.

En la figura 4.7 se presenta incremento de exergía del fluido vs rendimiento energético, manteniéndose contantes el flujo másico y la temperatura de entrada al colector.

Una de las destrucciones de exergía que se dan en los colectores solares de placa plana es la del calor que se pierde de la placa absorbedora hacia los alrededores, se analiza que entre mayor sea la temperatura promedio de placa absorbedora habrá más perdidas de calor por la placa.



Figura 4.7 Exergia VS Temperatura ambiente Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.4. Exergía destruida por transferencia de calor de placa- fluido VS temperatura aparente de la placa.

En la figura 4.8 se presenta Exergía destruida por transferencia de calor desde la Placa-Fluido vs Temperatura promedio de la placa, manteniéndose contantes el flujo másico y la temperatura ambiente.

Se analiza que la destrucción por la transferencia de calor de la placa-fluido asciende cuando aumenta la temperatura promedio de la placa, esto nos quiere indicar que habrá más transferencia de calor, pero de desarrollaran más perdidas por conducción y convección debido a la alta temperatura de la placa.



Figura 4.8 Exergia destr. P-F VS Temperatura placa Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.5. Exergía destruida por la temperatura aparente del sol-placa VS temperatura promedio de la placa.

En la figura 4.9 se presenta la exergía destruida por la temperatura aparente del solplaca vs temperatura promedio de la placa., manteniéndose contantes el flujo másico y la temperatura ambiente.

Se puede observar que la exergía destruida por la temperatura aparente del sol-placa va en descrecimiento conforme la temperatura de placa aumenta estos no indica que hay mejor captación de energía solar por la placa absorbedora y por lo tanto habrá menos destrucción de exergía.



Figura 4.9 Exergia destr. S-P VS Temperatura placa Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.6. Temperatura de salida del aire VS Flujo másico.

En la figura 4.10 se presenta la temperatura de salida del aire vs el flujo másico manteniéndose contantes la radiación solar y la temperatura de entrada del aire.

En el colector solar de placa plana con tiro forzado es muy importante el análisis del flujo másico por lo que se muestra que entre más alto sea el flujo másico la temperatura de salida del aire disminuye, por lo cual la transferencia de calor disminuye.



Figura 4.10 Temperatura de salida VS Flujo másico Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.
4.3.11.7. Rendimiento exergético VS Flujo másico

En la figura 4.11 se presenta la temperatura de salida del aire vs el flujo másico manteniéndose contantes la radiación solar y la temperatura de entrada del aire.

En los colectores solares de placa plana, se recomienda velocidades de ingreso bajas, en la investigación los rendimientos exergéticos más altos se obtuvieron con velocidades de entrada entre los 2 a 3,2 m/seg.

El flujo másico es directamente proporcional a la densidad del aire, su velocidad y su área, entonces se analiza que entre más alto sea el flujo másico el rendimiento va en descenso.



Figura 4.11 Rendimiento exergético VS Flujo másico Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.8. Incremento de exergía del fluido VS Flujo másico

En la figura 4.12 se presenta Incremento de exergía del fluido vs flujo másico manteniéndose contante la radiación solar y la temperatura ambiente.

Se analiza que entre más alto sea el flujo másico el incremento de exergía del fluido va en descenso, por lo que no permite desarrollar la transferencia de calor al fluido por la alta velocidad de entrada al colector solar.



Figura 4.12 Ex ganada por el fluido VS Flujo másico Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.9. Incremento de exergía del fluido VS Temperatura ambiente

En la figura 4.13 se presenta Incremento de exergía del fluido vs Temperatura ambiente, manteniéndose constante el flujo másico la temperatura de entrada de aire al colector.

Los resultados obtenidos establecen que entre mayor sea la temperatura de ambiente la exergía ganada por el fluido decrece.



Figura 4.13 Ex ganada por el fluido VS Temperatura ambiente Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.10. Radiación incidente VS Rendimiento Exergético.

En la gráfica 4,14 se muestra la Radiación incidente vs Rendimiento exergético, manteniendo constante la temperatura de ingreso al colector en 35 °C y la velocidad de entrada al colector en valores entre los 2 a los 3,6 m/s, donde los resultados obtenidos muestran que ha mayor radiación el rendimiento se eleva de forma exponencial.



Figura 4.13 Rendimiento Exergético VS Radiación Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.3.11.11. Radiación VS Temperatura de salida.

En la figura 4,14 se muestra el crecimiento de la Temperatura de salida de acuerdo al aumento de radicación, manteniendo constante la temperatura de ingreso al colector a 35 °C, lo que demuestra que ha mayor radiación incidente al colector mayor será el aumento de temperatura de salida del fluido.



Figura 4.14 Temperatura de salida VS Radiación Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

4.4. VERIFICACIÓN DE OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

4.4.1. Verificación del objetivo específico uno.

- Mediante un análisis en diferentes autores e investigadores sobre colectores solares se pudo determinar y estudiar cuales son las variables térmicas y geométricas que interviene en colector solar de placa plana.
- Se realizaron consultas a cada uno de los Ingenieros y docentes que dan la cátedra de transferencia de calor y termodinámica que realizan su trabajo prácticos con sistemas energéticos de intercambio de calor para desarrollar y determinar las variables geométricas y térmicas que interviene en el colector.
- Se realizó el estudio práctico sobres las pérdidas por transferencia de calor en los colectores solares tradicionales y así modificar que las variables térmicas y geométricas con el objetivo de potenciarlas.

4.4.2. Verificación del objetivo específico dos.

El colector solar de placa plana de tiro forzado se diseñó en el `programa GAMBIT con dimensiones y parámetros necesario para construir el colector en el taller de Mecánica Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

4.4.3. Verificación del objetivo específico tres.

El estudio energético del colector solar de placa plana nos permitió determinar el comportamiento térmico del colector solar, para un mejor desarrollo de la investigación determinaron las irreversibilidades que se dan en el colector constituido y se mencionan cada uno de la irreversibilidad que se manifiestan en este.

Se determinó la destrucción de la exergía o destrucción mediante la aplicación de modelos matemáticos y formulas debatidas con el tutor de la investigación. Estos datos servirán para posteriormente ser modelados mediante el software FLUENT para disminuir las

irreversibilidades que intervienen, tendiendo a mejorar el rendimiento exegético del colector solar de placa plana.

4.4.4. Verificación del objetivo específico cuatro.

Luego de determinar las irreversibilidades del colector solar de placa plana y otras variables que se dan el colector experimental se procedió a obtener el rendimiento energético, para realizar un estudio más exhaustivo de las pérdidas reales del colector solar se determinó también el rendimiento exergético para varias condiciones de operación.

• COMPROBACIÓN DE LA HIPOTESIS.

"El Estudio de las variables térmicas y geométricas y destrucción de la exergía en un colector solar placa plana de aire con tiro forzado para optimizar el proceso de secado de granos en la ciudad de Portoviejo.".

La hipótesis planteada se comprueba resultando ser afirmativa debido a que la investigación realizada en colectores solar de placa plana tiro forzada sobre el estudio exergético, análisis de las variables térmicas y geométricas y la destrucción de la exergía en un colector solar placa plana de aire con tiro forzado, permite establecer que materiales y dimensiones son los más adecuada para la construcción de un colector solar, el cual tendrá un rendimiento óptimo para el secado de granos o procesos de transferencia de calor.

4.5. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENE EN EL RENDIMIENTO.

La placa absorbedora es uno de los componentes importantes que se analizan dentro de la construcción de un colector solar, puesto que es el elemento principal en la captación de la radiación solar siendo su temperatura promedio una variable muy importante en el rendimiento energético. El revestimiento es de la placa absorbedora es un parámetro muy importante para el absorbedor porque se encarga de aumentar la captación de los rayos solares.

El flujo másico es otro parámetro muy a tener en cuenta ya que nos permite evaluar las variables térmicas en función de las variables de flujo de aire en el colector.

Una de las variables geométricas más importante que intervienen directamente en el proceso de transferencia de calor de la placa absorbedora al fluido es la altura del colector que se establece para un mejor rendimiento energético y exergético una altura de 7,5cm cubierta - placa absorbedora.

El estudio del tipo de flujo mediante el número de Reynolds que se desarrolla el colectar solar de placa plana es muy importante ya que mediante datos obtenidos e ingresado en el programa FLUENT se estableció mejor de transferencia de calor en el colector solar y en los cálculos energéticos nos resultaba un menor flujo másico y aumentaba su rendimiento exergético este cambio de flujo laminar a turbulento se realizada mediante la generación de vórtices.

El aleteado en una placa absorbedora produce una mayor concentración de temperatura ya que por medio de la turbulencia que las aletas producen, el aire recibe una mayor transferencia de calor útil, siendo mayor la temperatura a la salida del colector

4.6. RESULTADOS ALCANZADOS.

La presente investigación se realizó mediante un estudio de hace 2 años, observando el desarrollo de los agricultores y comerciantes que se hacen el secado de grano de forma tradicional, donde se puede evidenciar, que el secado tradicional tiene algunas desventajas:

La calidad del secado de grano, ósea al estar en la intemperie esta sumiso a recibir impurezas y que el producto no sea secado en su totalidad de forma uniforme. Otro factor importante el tiempo de secado que se consume en el proceso tradicional, generalmente en el secado de granos este a la intemperie de 2 a 3 días y con colector solar mediante una secador esta de 4 a 5 horas y sin impurezas esto nos equivale a un desarrollo de secado más eficiente y ahorro de tiempo que genera ahora económico.

Con el estudio de las variables geométricas y térmicas que intervienen en el colector solar de placa plana que propone mejorar el rendimiento del colector solar tradicional con la utilización de software de vinculación (GAMBIT- FLUENT).

Los resultados obtenidos nos permiten establecer un estudio del comportamiento de los procesos termodinámicos y de transferencia de calor dentro de una manera real, debido a las pruebas experimentales realizadas, por ejemplo se determinó la variación del calor útil transmitido al fluido en dependencia a variables como velocidad de entrada y flujo másico, variando estos parámetros se logró obtener datos que favorecen para el cálculo del rendimiento.

Según estudios realizados con anterioridad sostienen que una máquina solar está dentro de los parámetros normales al obtener como resultado en su balance energético valores comprendidos entre el 30-50 %, resultado alcanzado durante las pruebas realizadas a diversas días y con diferentes condiciones de radiación.

4.7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.7.1. Conclusiones

- Durante el recorrido de aire lo ideal para obtener una mayor tasa de transferencia de calor placa – aire el fluido debe de encontrarse en un estado turbulento ya que en éste estado se produce una mayor tasa de transferencia de calor.
- Se determinó que el estudio de exergético de un colector solar nos permite determinar las irreversibilidades presentes en este y poder establecer parámetros para la construcción de un nuevo colector disminuyendo las perdidas y obtenido un

mejor rendimiento exergético lo cual involucra un ahorro económico y de tiempo para el secado de granos.

- Se concluye que dentro de las variables geométricas del colector solar de placa plana de tiro forzado la altura del colector cubierta – placa absorbedora, al reducir el espacio por el cual fluye el aire, tiende a aumentar la transferencia de calor de la placa al fluido, la cual se disminuirá la destrucción de exergía que se da en la perdida calor de la placa hacia los alrededores, lo que permite elevar su rendimiento.
- El tipo de flujo determinado mediante el Numero de Reynolds es una variable térmica que interviene directamente al rendimiento exergético, lo cual mediante la toma de datos experimental del colector solar de placa plana sin generadores de vórtice se obtuvo un rendimiento exergético de 2,94 %, la simulación CFD permite diseñar y utilizar diversos tipos de aletas y variar el flujo másico con lo cual se obtiene un aumento de la transferencia de calor de la placa al fluido y tiende a elevar su rendimiento exergético.
- Mediantes los diferentes datos obtenidos en el colector solar de placa plana en la ciudad de Portoviejo de 11:00 -13:00, los valores obtenidos a las 13:00 fueron los que establecieron mediantes el cálculo energético de mayor eficiencia exergética y menor destrucción de exergía, teniendo en cuenta que la temperatura ambiente interviene directamente el rendimiento se estableció el promedio de 30 °C la cual es la óptima en la ciudad de Portoviejo para el estudio y funcionalidad de colectores solares de placa plana.

4.7.2. Recomendaciones.

- Para obtener un rendimiento aceptable se debe tener en cuenta el tipo de aislante a utilizar, para evitar las pérdidas de calor utilizando las normas recomendadas y realizando un estudio de los materiales para seleccionando el idóneo.
- Para realizar un estudio de las variables térmicas de los colectores solares de placa plana se necesita tener mucha información acerca de las cátedras de transferencia de calor y termodinámica para poder analizar cada uno de los procesos que ocurren en este equipo.
- El presente proyecto de titulación permite tener un enfoque más amplio para los estudiantes ya que permite interactuar con situaciones reales como tomas de medidas, análisis de propiedades y toma de decisiones luego de un balance o estudio realizado a un equipo.
- Para la construcción de colectores solares de placa plana se debe tener un modelo dimensionado con prácticas en construcción de equipos o diseño de maquinarias y tener un estudio de todas las variables que interfieren en él. La construcción y estudios de colectores solares que se aprovechan de la energía solar es muy importante para el desarrollo de los agricultores, comerciantes y empresarios porque les permiten someter a proceso a sus productos mediante el uso de energía limpia y renovable.
- Las velocidades de entrada al colector se deben de encontrar el rango de 2,5 a 5 m/s, mayor a este valor no se consigue una transferencia de energía consistente entre la placa absorbedora y el fluido, en valores menores a 1 m/seg está tendiendo a perder la funcionalidad del tiro forzado, porque se transformara en acumulador de calor por cierto tiempo.

- Realizar una minuciosa revisión de bibliografía y antecedentes de construcción de colectores de solares para el éxito de la investigación.
- Es necesario detectar las irreversibilidades generadas durante el funcionamiento del colector solar para reducirlas mediante la manipulación de las variables y aumentar la eficiencia.

4.8. PRESUPUESTO.

	DETALLES	VALORES
1	Materiales, suministros para la construcción del colector	\$ 100.00
2	Transporte de materiales (alquiler)	\$ 35.00
3	Ventilador centrifugo	\$ 50.00
4	Turbinas y accesorios	\$ 20,00
4	Gastos de alimentación.	\$ 50.00
5	Material bibliográfico y fotocopias	\$ 60.00
6	Anemómetro (alquiler)	\$ 50.00
7	Gastos de realización del Trabajo de Titulación.	\$ 80.00
ТО	TAL	\$445,00

En el presupuesto de la presente investigación se incluyen los valores requeridos para la ejecución de la misma, donde resaltan los valores constructivos, valores de alquiler de equipos de medición y servicios de impresión e internet.

4.9. CRONOGRAMA.

ACTIVIDAD		SEMANA																		
ТІЕМРО	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Revisión Bibliográfica	X																			
Aplicación de las técnicas.		X																		
Análisis de las técnicas en la investigación.			X																	
Planteamiento de problema.				X																
Elaboración de hipótesis.				X																
Visualización del alcance de estudio.					X															
Elaboración de objetivos.						Χ														
Diseño de la investigación.							Х		Х											
Desarrollo de la investigación.							Х	X	Х	Х										
Investigación sobre colectores solares.									X	X										
Revisiónde capitulos por del tutor					X			X			X							X	X	
Diseño del colector solar											X									
Selección de materiales del colector solar												X								
Construcción del colector solar										X	X	X	X	X						
Adaptación del ventilador centrifugo														Χ	Х					
Verificación de la construcción del															X					
Toma de datos del															v	v	v			
plana Cálculos exergéticos del															Λ	Λ	Λ			
colector solar																X	X	X		
objetivos.																	Х	Х		
Comparación y análisis de resultados.																		Χ	Х	
Conclusiones y recomendaciones.																				X

BIBLIOGRAFÍA

- Bioclimática, E. R. (2012). *E. Renovables y Arquitectura*. Recuperado el 08 de 2016, de http://erenovablesarqbioclimatica.blogspot.com/2012/02/energia-solar-termica-debaja_04.html
- Cantos, L. p. (s.f.). Ingnierio .
- Cengel, Y. A. (2010). *Transferecia de Calor y Masa* (Septima ed.). Mexico, Mexico, México: Mc. Graw Gill. Recuperado el 08 de 2016
- Cengel, Y. A. (2012). termodinamica (Vol. septimo). madrid: mc grill.
- *Colector Solar* . (2010).
- Colombia, E. y. (2011). *Equipos y Laboratorios*. Obtenido de http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3121
- Construmatica. (2011). *Construmantica, Metroportal de Arq., Ing. y Constr.* Recuperado el 2016
- Dunkle, C. y. (1982).
- Eco-Active. (2013). *Ecoactive*. Recuperado el 03 de 08 de 2016, de http://ecoactivate.co/energia-solar-aplicaciones-domesticas-e-industriales/
- ecured. (18 de 01 de 2016). *ECURED Conocimiento con Todos y para Todos*. Obtenido de https://www.ecured.cu/Piran%C3%B3metro
- Emilio. (08 de 2013). *dedec*. Obtenido de http://www.dedec.net/tikiread_article.php?articleId=14
- EnerSolarTermica. (2010). *Energiasolartermica*. (M. Loureio, Ed.) Recuperado el 08 de 2016, de http://www.marioloureiro.net/ciencia/EnerSolarTermica/SolarPROCESOSTERMO/S olar3%20.pdf
- Esther. (Mayo de 2016). *El Block Verde* . (Esther, Editor) Recuperado el agosto de 2016, de http://elblogverde.com/energia-solar/

- Farahat, S., Sarhadd, F., & Ajam, H. (2009). *Exergetic optimization of flat plate solar collectors*. Recuperado el Agosto de 2016
- G., L., & H., B. (2011). Colectores Solares. Recuperado el 02 de 08 de 2016
- International, P. I. (17 de 12 de 2017). www.pce-iberica.es/. (PCE, Ed.) Recuperado el 18 de 01 de 2017, de http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumentode-temperatura/pirometro-20.htm
- Isover. (2011). Termica de los Edificios. Obtenido de http://www.ehu.eus/mmtde/materiala/aislamtoedificios/isover/Termica.pdf
- Juan, G., Lenin, P., & Rubén, B. (Febrero de 2016). *Revista Científica Ingeniería Energética*. (G. B. Juan, Ed.) Recuperado el 02 de agosto de 2016, de http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/471/501
- Larrea., & Bayas.H. (2011). Colectores Solares. Recuperado el 02 de 08 de 2016
- Martin, C. (2012). Analisis de Colectores.
- NASA. (01 de 2017). *Surface meteorology and Solar Energy*. Obtenido de https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov
- Perez, J. G.-B. (2016). Análisis paramétrico del desempeño térmico de colectores solares planos de aire de circulación natural. *Ingenieria Mecánica*.
- Pérez, L. B., & Alvarez, M. (2012). *Cuba Sol.* Recuperado el 2016, de http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar08/HTML/articulo03.htm
- Pita. (2016). Ingeniero Mecánico .
- Redriguez, H. (2012). Energía
- RENEDO, C. J. (2011). personales.unican. Obtenido de personales.unican.es/renedoc/.../Trasp%20AA/001%20Tran%20Calor%20OK.pdf
- Sol-Arq. (enero de 2015). *Sol-Arq soluciones*. Recuperado el junio de 2016, de http://www.sol-arq.com/index.php/radiacion-solar/radiacion-tierra
- termocan. (2011). Termocan . *Ecotop*.

- Terold. (2011). *Terol*.
- Varela, A. (2007). Diseño de un colector solar para el calentamiento de agua. quito.
- Varela, A. (2007). Diseño y construcción de un colector solar plano convencional para calentamiento de aire, para placas intercambiables. quito, Pichincha, Ecuador.
- Vintimilla, W. F.–J. (2011). *Resitorio de la Universidad de Cuenca*. Recuperado el 08 de 12 de 2016, de www.ucuenca.edu.ec/
- Wikipedia. (2016). *wikipedia*. Recuperado el 12 de 01 de 2017, de https://es.wikipedia.org/wiki/Piran%C3%B3metro

ANEXOS

ANEXO Nº 1

Diseño y dimensionamiento del colector solar de placa plana con tiro forzado

Colector solar modelado en la herramienta virtual Autocad 2D.





Vista superior del colector solar de placa plana en AutoCad 3d



160cm

ANEXO Nº 2

Construcción del colector solar de placa plana tiro con forzado.



Construcción de la carcasa del colector



Construcción de la carcasa del colector



Construcción de un modelo a escala real del colector solar



Corte la plancha galvanizada 1/20 para la ducto de entrada del colector



Proceso de doblado de la carcasa del colector solar



Corte del Angulo 3/16x 2" para la estructura del colector solar



Unión de la estructura base del colector solar de placa plana.



Elaboración del acople para la turbina de 24 cm diámetro del ventilador centrifugo



Instalación de la cubierta de vidrio de 6 mm para el colector solar



Ensamblaje del ducto de entrada para la toma de datos experimentales



Corte de la carcasa del ventilador centrifugo aplicando el proseo de corte por plasma.



Ensamblaje de la carcasa del ventilador centrifugo



Instalación eléctrica del motor del ventilador y el selector de velocidades.



Instalación del acople motor turbina



Corte de la plancha galvanizada de 1/16" para la placa absorbedora



Toma de medidas y manipulación de las variables Geométricas



Análisis de diferentes tipos de Aislante.



Toma de medidas de las variables geométricas del colector solar



Aplicación de pintura al colector solar.



Proceso de pintado del ducto de salida del colector.

ANEXO Nº 3

Toma de datos en la unidad experimental instalada en la universidad técnica de Manabí.



Establecimiento del colector solar en el área destinada para su funcionamiento



Toma de los datos del colector solar como velocidad, temperatura mediante un anemómetro HYELEC.



Toma de medidas y manipulación de las variables térmicas del colector solar como velocidad y temperatura de entrada a las 12:00 pm



Cambio de la Turbina del ventilador centrifugo para realizar diferentes pruebas.


Inspección del colector solar de placa plana con tiro forzado por parte del tutor



Toma de las variables del colector como velocidad y temperatura de salida con el anemómetro.



Toma de la temperatura de la cubierta en diferentes puntos mediante la cámara termo gráfica FLIR E49001



Toma de la temperatura de la placa absorbedora en diferentes puntos mediante la cámara termo gráfica FLIR E49001.



Recolección de los datos de temperatura de 11:00 a 13:00 en diferentes puntos para la obtención de la temperatura promedio de la placa.



Recolección de los datos de temperatura de 11:00 a 13:00 en diferentes puntos para la obtención de la temperatura promedio de la cubierta.

Anexo 4.

Encuestas realizadas a los estudiantes y docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Manabí



Universidad Técnica de Manabí



Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas

Carrera de Ingeniería Mecánica

Encuesta a estudiantes y docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica referente al tema de investigación "ESTUDIO DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y GEOMÉTRICAS Y DESTRUCCIÓN DE LA EXERGIA EN UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN LA CIUDAD DE PORTOVIEJO"

1. Considera usted importante realizar un estudio de las variables geométricas del colector solar de placa plana, tiende a elevar su rendimiento.

OPCIONES	RESPUESTAS	PORCENTAJES					
Si	17	85					
No	0	0					
En partes	3	15					
TOTAL	20	100					



Los resultados de la pregunta número 1, permiten evidenciar que las personas encuestadas tienen conocimiento de la estrecha relación entre las variables geométricas constructivas del colector y el rendimiento que proporcionará la máquina.

2.-Conoce usted las irreversibilidades que se desarrollan en el colector solar de placa plana.

OPCIONES	RESPUESTAS	PORCENTAJES					
Si	3	15					
No	12	60					
En partes	5	25					
TOTAL	20	100					



Los resultados de la pregunta, permite tener la visión de que el tema a investigar es nuevo en el ambiente estudiantil y esto fomenta a que los estudiantes se preparen de mejor manera, acorde a los avances de la energía alternativa.

OPCIONES	RESPUESTAS	PORCENTAJES
Si	17	85
No	0	0
En partes	3	15
TOTAL	20	100



La mayoría de los profesionales encuestados coincidieron que al instalar un sistema para impulsar el aire de entrada al colector, aumentara el rendimiento del equipo, teniendo en cuenta las velocidades a las cuales sea sometido el fluido.

4. Considera usted que el estudio exergético del colector solar de placa plana, establecerá nuevos parámetros para mejorar su rendimiento.

OPCIONES	RESPUESTAS	PORCENTAJES
Si	20	100
No	0	0
TOTAL	20	100



La respuestas de los encuestados es contundente al afirmar que la aplicación de un análisis exergético del colector solar permitirá tomar acciones que estén direccionadas a mejorar el rendimiento de la máquina.

Anexo 5.

Material bibliográfico relativo para la investigación.

Ciudad	LAT		LONG		msnm	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ОСТ	NOV	DEC	PROMEDIO
Ambato	1,28	s	78,63	W	2540	4,64	4,56	4,56	4,42	4,39	3,97	4,28	4,5	4,5	4,97	5	4,81	4,55
Babahoyo (I. Maria)	1,82	s	79,55	W	7	3,67	3,97	4,36	4,31	3,81	3,25	3,39	3,69	3,78	3,72	3,69	3,72	3,78
Bahia de Caraquez	0,60	s	80,38	W	3	3,83	4,14	4,67	4,53	4,14	3,31	3,64	3,94	3,89	3,92	4,06	4,17	4,02
Baños	1,40	S	78,42	W	843	4,25	4,28	3,94	4,11	4,08	3,61	3,89	4,11	4,19	4,75	4,69	4,5	4,2
Boyaca	0,57	S	80,18	W	30	3,33	3,36	4,36	3,83	3,67	3,31	3,56	3,94	3,81	4,11	3,94	3,83	3,75
Bucay	2,17	S	79,27	W	317	3,22	3,39	3,75	3,5	3,31	2,86	3,28	3,5	3,28	3,42	3,39	3,42	3,36
Camposano	1,58	S	80,40	W	120	3,56	3,86	4,36	4,31	4,19	3,53	4,28	4,11	4,28	4,64	4,39	3,89	4,12
Cañar	2,62	S	78,93	W	3104	4,47	4,28	4,36	4,28	4,56	4,31	4,92	4,89	4,58	4,78	4,83	4,75	4,58
Cariamanga	4,32	S	79,57	W	1950	4,28	4,22	4,36	4,33	4,64	4,81	5,08	5,39	4,67	5,75	5,33	4,64	4,79
Charles Darwin	0,73	S	90,30	W	6	4,69	5,03	5,39	5,5	4,53	4,19	3,64	3,53	3,69	4,14	4,36	4,17	4,41
Coca	0,45	S	76,98	W	200	3,83	4,53	3,53	4,14	4,14	3,39	3,83	3,83	3,78	4,33	4,25	4,56	4,01
Cotopaxi	0,62	S	78,57	W	3560	4,31	4,25	3,94	3,64	3,75	3,86	4,14	4,64	4	4,44	4,56	4,17	4,14
Cuenca-Ricaurte	2,85	S	78,95	W	2562	4,58	4,58	4,56	4,28	4,25	3,92	4,22	4,39	4,39	4,78	5,06	4,97	4,5
El Puyo	1,58	s	77,90	W	950	3,56	3,56	3,64	3,53	3,69	3,44	3,69	4	4	4,33	4,28	3,89	3,8
Flavio Alfaro	0,40	s	79,60	W	150	3,17	3,56	4,06	3,53	3,64	3,31	2,94	3,03	3,28	3,81	3,83	3,75	3,49
Guayaquil-	2,20	5	/9,88	W	0	4	4,17	4,6/	4,58	4,50	3,80	4,17	4,5	4,6/	4,56	4,31	4,44	4,37
Aeropuerto	2,20	S	79,88	W		3,43	4,41	3,4	4,35	4,32	3,59	4,36	3,63	5,69	4,16	3,72	4,61	4,14
Hacienda Sangay	1,70	S	77,90	W	970	3,47	3,47	3,75	3,61	3,69	3,44	3,61	4	4	4,25	4,08	3,81	3,77
Hda. San Vicente	0,57	S	80,43	W		3,91	4,23	4,17	4,81	4,05	3,63	2,99	3,18	3,02	3,36	3,17	3,71	3,68
Ibarra	0,35	N	78,13	W	2228	4,44	4,42	4,36	4,36	4,58	4,36	4,89	4,97	4,61	4,72	4,5	4,5	4,56
Puerto Bolivar	3,35	S	80,00	W	6	4,42	4,81	5	4,56	4,78	4	3,72	4,17	3,78	3,86	3,83	4,69	4,3
Puerto Ila	0,38	S	79,55	W	260	3,44	3,64	4,06	3,83	3,56	3,11	3,36	3,44	3,39	3,5	3,44	3,36	3,51
Puerto Lopez	1,57	S	80,80	W	6	4,25	4,56	5	4,69	4,28	3,08	3,22	3,42	3,08	3,31	3,67	3,89	3,87
Quininde	0,33	S	79,47	W	95	3,5	3,72	4,14	3,86	3,47	3,42	3,47	3,64	3,39	3,81	4,03	3,53	3,66
Quito-Naquito	0,13	S	78,48	W	2812	4,94	4,64	4,78	4,53	4,83	4,69	5,53	5,47	4,89	5,25	5,14	5,14	4,99
Riobamba	1,67	s	78,63	W	2754	4,44	4,56	4,36	4,22	4,39	4,06	4,47	4,61	4,5	4,75	4,61	4,72	4,47
Rumipamba	1,02	s	78,58	W	2628	4,72	4,56	4,56	4,22	4,61	4,28	4,5	4,72	4,69	4,64	4,89	4,86	4,6
Salinas	2,18	s	80,98	W	6	4,67	5,17	5,19	5,17	4,92	4,03	3,67	3,69	3,39	3,53	4	4,86	4,36
Salinas-La Puntilla	2,20	s	81,02	W		4,14	5,02	4,79	5,41	4,53	3,8	2,79	2,83	3,02	2,81	3,25	4,62	3,92
San Carlos	2,28	s	79,42	W	35	3,5	3,58	4,06	3,92	3,58	3,06	3,28	3,39	3,39	3,53	3,5	3,72	3,54
San Cristobal	0,90	s	89,62	W	6	4,72	5,44	5,92	5,58	5,5	4,92	4,89	4,83	4,58	4,86	4,97	4,86	5,09
San Juan-La Mana	0,95	s	79,32	W	223	3,28	3,47	3,83	3,64	3,33	3	3,22	3,42	3,39	3,5	3,44	3,39	3,41
San Lorenzo	1,28	N	78,85	W	5	3,64	4	4,44	4,28	4	3,56	3,83	3,78	3,81	3,89	3,67	3,47	3,86
San Simon	1,65	s	78,98	W	2600	4,14	4,06	4,36	4,11	4,28	4,17	4,89	5	4,58	4,75	4,58	4,61	4,46
Santa Isabel	3,33	s	79,33	W	1598	3,92	3,92	4,06	3,89	4	4,06	4,58	4,64	4,47	4,78	4,89	4,5	4,31
Santa Rosa	3,43	s	79,97	W		2,77	3,04	3,77	4,03	3,69	2,94	3,13	3,06	2,85	2,79	2,64	3,46	3,18
Santo Domingo	0,23	s	79,27	W	600	3,14	3,5	3,83	3,75	3,5	3,11	3,47	3,5	3,39	3,5	3,33	3,25	3,44
Tabacundo	0,05	N	78,22	W	2876	4,64	4,5	4,56	4,56	4,58	4,17	4,72	4,89	5	4,42	4,19	4,5	4,56
Taura	2,33	S	79,82	W	17	3,5	3,78	4,17	4	3,78	3,22	3,58	3,89	3,69	3,72	3,81	3,42	3,71
Tiputini	0,75	S	75,53	W	220	4,53	4,33	4,17	3,83	3,94	3,64	3,92	4,53	4,58	4,69	4,56	4,47	4,27
Tulcan	0,82	s	77,70	W	2950	4,06	4,11	4,14	3,86	4,17	3,92	4,31	4,39	4,19	4,31	4,19	4	4,14

Fuente: (Vintimilla, 2011)