

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

Facultad De Ciencias Matemáticas, Físicas Y Química *Escuela De Ingeniería Mecánica*

Trabajo de Titulación

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO MECÁNICO

Modalidad: Proyecto Investigativo

TEMA:

"SIMULACIÓN CFD DE UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA ELEVAR LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA"

Profesionales en formación:

Zambrano Pisco Javier Antonio Zevallos Cobeña José Gregorio

Director del Trabajo de Titulación:

Ing. Lenin Julián Pita Cantos. M. Sc.

PORTOVIEJO – MANABÍ – ECUADOR

2017

DEDICATORIA

Al igual que un examen, la vida es un test donde existen preguntas fáciles y otras difíciles, pero no imposibles.

"El secreto para triunfar y llegar al éxito consiste en respectar una sola regla... "Nunca te mientas a ti mismo".

Muchas veces cuando nos encontramos en una situación difícil o nos tropezamos en una batalla hemos pensado en darnos por vencidos, pero es ahí cuando debemos de recordar que para triunfar no dependemos en victorias fáciles sino en derrotas que nos llenen de coraje y valentía para levantarnos, ya que el éxito no se mide por lo que alcancemos sino por las dificultades que superemos.

Dedico este trabajo de titulación a DIOS quien me otorgó la oportunidad de estar vivo, de guiarme siempre por el camino correcto, de seguir adelante y sobre todo por darme fe y las fuerzas necesarias para nunca decir no puedo hacerlo.

A mis padres por ser ejemplo de honestidad y honradez, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, por apoyarme, colmarme de consejos y por enseñarme que si se quiere llegar a la cumbre no hay que superar a los demás sino a uno mismo.

A mi hermana, mi enamorada y todos aquellos que me llenan de ánimos para no rendirme, gracias por el amor y apoyo constante e incondicional que siempre me brindan y me seguirán brindando.

Nunca olvidemos que en la vida no es importante lo fuerte que se golpea sino lo fuerte que se es cuando la vida nos golpea.

José Gregorio Zevallos Cobeña.

DEDICATORIA

Cualquier cosa que la mente del hombre puede concebir y creer, puede ser conseguida.

Esta tesis se la dedico a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy.

Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar este trabajo de titulación y a mi novia que con todo su apoyo incondicional me supo comprender en todos los momentos y me supo guiar en lo bueno para poder lograr las metas que me había propuesto.

A todos los docentes que me instruyeron dentro de esta prestigiosa alma mater UNIVERSIDAD TECNICA DE MANBI se los dedico de todo corazón porque en todo momento me guiaron para que fuese un profesional.

Javier Antonio Zambrano Pisco.

AGRADECIMIENTO

En la vida todos tenemos una misión y muchos objetivos. Una misión que DIOS nos encomienda a cada uno y muchos objetivos para cumplir esa misión y alcanzar metas de triunfo y éxito, que solo se pueden lograr cuando nuestros sueños son más grandes que nuestros pretextos.

Ser derrotados no significa el final ni tampoco el peor de los fracasos, al contrario, el no intentarlo es en verdad el fracaso, ya que seguir luchando en momentos en los que uno piensa que ya no puede más es aquello que nos hace diferente a los demás.

Agradezco infinitamente a DIOS porque de cualquier forma gracias a EL tengo todo lo que me rodea y es fuerza de motivación y perseverancia para ser mejor cada día. A mis padres, mi hermana, mi enamorada y a todos aquellos que creyeron en mí y que de alguna u otra forma me han apoyado ayudándome a dar cada uno de mis pasos hacia mis metas.

Quiero agradecer a la Universidad Técnica de Manabí y en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas por haberme acogido como estudiante permitiéndome desarrollar nuevas experiencias en el transcurso de mi carrera universitaria.

Al Ing. Lenin Pita tutor de este trabajo de titulación por guiarme constantemente hacia un buen desarrollo de esta investigación, a mis compañeros con los cuales pasamos momentos de alegría y de tristeza, a todos los docentes que nos impartieron sus cátedras y plasmaron nuevos conocimientos en mi léxico formándome de la mejor manera para mi vida profesional.

Quiero dar las gracias a todos por enseñarme que, si día a día coloco un ladrillo, en un tiempo construiré una pared sólida llena de esfuerzo, sabiduría, ética, valores y consejos.

José Gregorio Zevallos Cobeña.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecerte a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A la UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ por darme la oportunidad de participar como estudiante y a la CARRERA DE ING. MECANICA de ser un profesional. A mi TUTOR de tesis, Ing. Lenin Pita Cantos por el esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación.

Enorme agradecimiento a mis padres porque son héroes y mi ejemplo. Por mostrarme el camino recto que los buenos hombres siguen y por dar todo por mí, y de antemano a mi novia que es un pilar muy importante en mi vida.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Javier Antonio Zambrano Pisco.

CERTIFICACION DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICACIÓN

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 "SIMULACIÓN CFD DE UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA ELEVAR LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA", desarrollada por los profesionista: Señor, Zambrano Pisco Javier Antonio, Señor, Zevallos Cobeña José Gregorio 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

CERTIFICACION 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: "SIMULACIÓN CFD DE UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA ELEVAR LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA", desarrollado por los profesionistas: Señor, Zambrano Pisco Javier con cédula Nº 131471248-8 Antonio y Señor, Zevallos Cobeña José Gregorio con cédula Nº 131484989-2, 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. REVISOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN SOBRE DERECHOS DEL AUTOR

Quienes firmamos la presente, profesionistas; ZAMBRANO PISCO JAVIER ANTONIO Y ZEVALLOS COBEÑA JOSÉ GREGORIO, en calidad de autores del trabajo de titulación realizada sobre "SIMULACIÓN CFD DE UN COLECTOR SOLAR PLACA PLANA DE AIRE CON TIRO FORZADO PARA ELEVAR LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE SECADO DE GRANOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA", 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.

Zambrano Pisco Javier Antonio

ambrano Pisco Javier Antoni AUTOR

Zevallos Cobeña José Gregorio AUTOR

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se presenta una serie de capítulos para realizar la simulación CFD de un colector solar de placa plana con tiro forzado tendiente a mejorar la eficiencia en el proceso de secado de granos y beneficiar al sector agrícola.

Primeramente, se describe el marco teórico de la radiación solar, las variables térmicas y geométricas del colector y se explican los diversos modelos que actúan durante el funcionamiento de este dispositivo.

Posteriormente por medio de un análisis se plantearon diversas ecuaciones para establecer el rendimiento energético y exergético del colector solar de aire.

Consecutivamente, mediante la aplicación del paquete Hummingbird CFD, en Gambit se diseñó la geometría y la generación del mallado del colector solar, y en Fluent se realizó la simulación correspondiente del mismo.

Por último, mediante un análisis y discusión de resultados sobre la investigación efectuada se lograron obtener valores factibles que logran elevar la eficiencia en el colector solar de placa plana optimizando su geometría y aprovechando de mejor manera las variables térmicas.

PALABRAS CLAVES:

ENERGÍA SOLAR, COLECTOR SOLAR, RENDIMIENTO, EXERGÍA, SIMULACIÓN CFD.

SUMMARY

In the present work of titling a series of chapters is presented to realize the CFD simulation of a flat plate solar collector with forced draft tending to improve the efficiency in the process of drying of grains and to benefit to the agricultural sector.

First, we describe the theoretical framework of solar radiation, the thermal and geometric variables of the collector and explain the various models that operate during the operation of this device.

Subsequently by means of an analysis several equations were proposed to establish the energy and exergetic performance of the solar air collector.

Consequently, through the application of the Hummingbird CFD package, the geometry and the generation of the solar collector mesh were designed in Gambit, and in Fluent the corresponding simulation was carried out.

Finally, by means of an analysis and discussion of results on the research carried out, feasible values were obtained that raise efficiency in the flat plate solar collector by optimizing its geometry and taking better advantage of the thermal variables.

KEYWORDS:

SOLAR ENERGY, SOLAR COLLECTOR, PERFORMANCE, EXTRACTION, CFD SIMULATION.

ÍNDICE

Dedicatoria	II
Agradecimiento	IV
Certificacion del Director del Trabajo de Titulación	VI
Certificacion del Revisor del Trabajo de Titulación	VII
Declaración sobre Derechos del Autor	VIII
Resumen	IX
Summary	X
Índice	XI
CAPÍTULO I	17
1. Tema	17
1.1. Localización del Proyecto	17
1.1.1. Macro localización.	17
1.1.2. Micro Localización.	
1.2. Antecendentes	19
1.3. Justificación.	
1.4. Planteamiento del problema	
1.4.1. Descripción de la realidad problemática.	
1.5. Formulación del problema	24
1.6. Delimitación de la investigación	24
1.6.1. Espacial	24
1.6.2. Temporal	

1.7. Hipótesis	
1.7.1. Variable Independiente.	
1.7.2. Variable Dependiente	
1.8. Visualización del alcance del estudio.	
1.8.1. Aporte en lo Social	
1.8.2. Aporte en lo Económico	
1.9. Objetivos	
1.9.1. Objetivo General.	29
1.9.2. Objetivos Específicos	29
CAPÍTULO II	30
2. Energía Solar	
2.1. Aprovechamiento de la energía solar en el mundo	31
2.2. Aprovechamiento de la energía solar en el Ecuador	
2.3. Radiación directa y difusa en la tierra	
2.3.1. Radiación directa	
2.3.2. Radiación difusa	35
2.4. Constante solar	37
2.5. Posición relativa sol-tierra	37
2.6. Angulo horario a la salida del sol	37
2.6.1. Altura solar, β	37
2.6.2. Ángulo cenital solar	
2.6.3. Acimut.	

2.6.4. Latitud <i>L</i> :	. 39
2.6.5. Declinación δ :	. 39
2.6.6. Inclinación <i>i</i> :	. 39
2.6.7. Angulo acimut de superficieγ:	. 39
2.6.8. Angulo horario ω:	. 39
2.6.9. Angulo de incidencia θ :	. 39
2.7. Radiación solar sobre un plano horizontal	. 40
2.8. Radiación solar sobre un plano inclinado.	. 41
2.9. Transmisión de la radiación solar a través de una atmosfera clara	. 42
2.10. Exergía de la radiación solar	.42
2.11. Modelos exergéticos de la radiación solar	. 43
2.11.1. Modelo de Petela	.44
2.12. Colectores solares	.45
2.12.1. Colector solar placa plana de aire con tiro forzado	. 47
2.12.2. Características de los componentes del colector solar de aire tiro forzado	.48
2.12.2.1. Carcasa del colector	. 49
2.12.2.2. Cubierta transparente	. 50
2.12.2.3. Placa absorbedora	52
2.12.2.4. Aislamiento del colector solar de aire	54
2.13. Circulación forzada del colector solar de aire	. 55
2.14. Variables térmicas del colector solar de aire	. 57

2.14.1. Densidad del aire.	
2.14.2. Calor específico del aire.	
2.14.3. Número de Reynolds	
2.14.4. Número de Nusselt.	61
2.15. Variables geométricas del colector solar de aire	62
2.15.1. Inclinación del colector solar plano	64
2.16. Pérdidas de calor en el colector solar de aire	64
2.17. Transferencia de calor en el colector solar de aire	68
2.18. Rendimiento energético del colector solar	70
CAPÍTULO III	72
3. Análisis exergético de un colector solar plano de aire	72
3.1. Entropía	72
3.1.1. Balance de entropia para el colector solar de aire	73
3.2. Exergía	74
3.2.1. Transferencia de exergía por calor y masa	75
3.2.2. Balance de exergía en un colector solar plano de aire	
3.2.3. Rendimiento exergético de un colector solar de aire	
CAPÍTULO IV	84
4. Simulación CFD de un colector solar placa plana de aire	84
4.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	
4.2. Generadores de vórtice	86
4.3. Modelación de la geometría del colector solar	

4.3.1. Pasos para creación de la geometria en GAMBIT	
4.3.2. Tipos de aletas	
4.3.3. Creación de la geometría de la placa absorbedora aleteada	94
4.3.4. Sustracción de volúmenes aire-aletas	
4.3.5. Conexión de las superficies del colector solar	
4.4. Generación de malla	
4.4.1. Mallado de la altura de la placa a la entrada y salida	
4.4.2. Mallado de la altura del aislante a la entrada y salida	
4.4.3. Mallado de la altura del vidrio a la entrada y salida	
4.4.4. Mallado de la altura del aire a la entrada y salida	
4.4.5. Mallado del ancho del colector solar	
4.4.6. Mallado de la profundidad del colector solar	
4.4.7. Mallado por volumen	
4.5. Especificación de las condiciones de contorno	
4.6. Especificación de tipos de condiciones	
4.7. Modelación en software Fluent	
4.8. Definición de modelos	113
4.9. Definición de propiedades	114
4.10. Definición de fronteras y condiciones de entrada	115
4.11. Obtención de perfiles de temperatura	118
4.12. Determinación de eficiencias en colectores modelados	
4.12.1. Rendimiento energético	

4.12.2. Incremento de flujo de exergía en el fluido	
4.12.3. Tasa de exergía de la radiación solar	121
4.12.4. Destrucción de exergía del colector solar de placa plana	
4.12.5. Exergía Transferida de la placa absorbedora al fluido	
4.12.6. Eficiencia exergética del colector solar	
4.13. Análisis y discusión de resultados	124
4.14. Caracteristicas del colector de mayor eficiencia para su construcción	134
4.15. Verificación de objetivos específicos	137
4.15.1. Verificación del objetivo específico uno	137
4.15.2. Verificación del objetivo específico dos	137
4.15.3. Verificación del objetivo específico tres	138
4.16. Comprobación de la hipótesis	138
4.17. Resultados alcanzados	138
4.18. Conclusiones y recomendaciones	140
4.18.1. Conclusiones	140
4.18.2. Recomendaciones	141
4.19. Presupuesto	143
4.20. Cronograma	144
BIBLIOGRAFÍA.	
ANEXOS.	

XVI

CAPÍTULO I

1. Tema.

Simulación CFD de un colector solar placa plana de aire con tiro forzado para elevar la eficiencia en el proceso de secado de granos en el sector agrícola.

1.1. Localización del Proyecto.

1.1.1. Macro localización.

La presente investigación se llevará a cabo dentro del territorio ecuatoriano, en la provincia de Manabí, cantón Portoviejo, parroquia 12 de marzo, Avenida José María Urbina y Che Guevara, en la Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Carrera de Ingeniería Mecánica.



Figura 1.1. Macro localización de la Universidad Técnica de Manabí.

1.1.2. Micro Localización.

El espacio donde se va a proceder a realizar la investigación, es en los laboratorios y talleres de la Carrera de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí, donde funcionan diversas máquinas, dispositivos y herramientas que serán de aplicación para nuestro proyectó investigativo.



Figura 1.2. Micro localización de taller de Ingeniería Mecánica en el interior de la Universidad Técnica de Manabí.

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 plantas 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 de 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 software 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 con el incremento de 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.

En el caso de la simulación del colector solar de tiro forzado se puede hacer uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) que es una aplicación empleada para el diseño de estos dispositivos para calentamiento de aire, además de poder ser aplicada para obtener las temperaturas de cada componente del colector y el rendimiento térmico instantáneo. También ofrece los elementos para determinar la constante de tiempo que caracteriza la dinámica del colector, se considerarán los parámetros que gobiernan la transferencia de calor previo al diseño y construcción, posteriormente en el lugar donde se realizará la investigación en la ciudad de Portoviejo se realizarán pruebas en condiciones climáticas donde la temperatura ambiente promedio que es 26 °C y la humedad relativa es 76.2 % anual.

1.3. Justificación.

El propósito de nuestra investigación es disminuir las irreversibilidades, durante el cumplimiento de los procesos termodinámicos presentes en colectores solares de placa plana de aire con tiro forzado a través de un software de simulación CDF; para esto debemos de modelar teóricamente y establecer los parámetros de diseño (dimensiones del colector, tipo de material de cubierta y dimensiones, material de la placa absorbedora y sus dimensiones, eficiencia óptica y espesor de aislamiento) mediante un análisis exergético.

El desarrollo del proyecto posee una factibilidad considerable ya que al utilizar modelos teóricos obtenemos los parámetros que logren reducir el tiempo de secado y elevar la eficiencia del mismo, para el efecto se aplicara una simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) con el fin de diseñar un colector solar placa plana de aire con tiro forzado que aporte de manera considerable a la experimentación directa con la realidad para conseguir los resultados esperados.

Una vez que se logre la investigación propuesta será de mucha utilidad en diversos campos, como por ejemplo en agros donde en ocasiones no se tiene el acceso a la energía eléctrica y los agricultores que difieren el tiempo de secado de un determinado grano entre 3 a 4 días.

También sería empleado para el trabajo en plantas secadoras de granos reduciendo en gran porcentaje la contaminación que producen estas secadoras y aportando de forma considerable al uso de energía renovables como lo es la energía solar.

1.4. Planteamiento del problema.

1.4.1. Descripción de la realidad problemática.

En la actualidad el secado de granos se lo realiza por el método tradicional directamente expuesto al sol y en máquinas de secado que usan combustibles de origen fósil que emiten un alto grado de contaminación al ambiente y un mayor uso de los recursos del planeta.

Diversas plantas secadoras de gramíneas utilizadas en actividades agrícolas no logran concluir satisfactoriamente su trabajo, ya que en varias ocasiones el clima no es el adecuado para realizar el respectivo secado y el tiempo en efectuar la deshidratación en el grano es demasiado prolongado provocando deterioración o un bajo grado de secado del mismo lo que descarta la probabilidad de que sea usado para cultivarse o almacenarse para la fabricación de algún producto.

La investigación analizará los procesos de secado, realizará un análisis comparativo de colectores y presentará la aplicación de modelos teóricos y su análisis termodinámico para la aplicación en la simulación digital.

Considerando los parámetros ambientales, la humedad de los granos y la transferencia de calor la simulación del colector solar contará con todas las características necesarias para secar granos con mayor eficiencia y calidad, reduciendo la emisión de gases contaminantes y descartando el uso de combustibles fósiles. Además, dependiendo del grado de humedad que contengan los mismos se logrará calcular y establecer tiempos específicos para que la deshidratación del grano llegue exactamente a un punto requerido dependiente del uso que se le atribuya.

Pretendemos efectuar una simulación CFD de colector solar placa plana que cumpla con las exigencias necesarias para el deshidratado de granos, con él se logren temperaturas altas, humedades relativas bajas y una remoción adecuada del agente secante (aire) para así dar respuesta a la gran demanda de los granos secos donde existen condiciones idóneas y un potencial energético solar para implementar estas tecnologías. Se podrán conservar los granos por periodos extendidos con mayor valor comercial, donde se favorecerá económicamente a la población, además se resuelven problemas técnicos – productivos sin agresión al medio ambiente, podemos implantarlos en comunidades de difícil acceso y de escasos recursos energéticos.

1.5. Formulación del problema.

¿De qué manera incide la simulación CFD en los parámetros de diseño de colectores solares placa plana de aire con tiro forzado para elevar la eficiencia en el secado de variedades de granos?

1.6. Delimitación de la investigación.

1.6.1. Espacial.

La investigación se desarrollará en la ciudad de Portoviejo en la Universidad Técnica de Manabí, en los talleres y laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

1.6.2. Temporal.

El tiempo de análisis para la presente investigación está comprendido entre junio del año 2016 y febrero del año 2017.

1.7. Hipótesis

La Simulación CFD de los parámetros térmicos y geométricos de colectores solares placa plana de aire con tiro forzado permitirá elevar la eficiencia en los procesos de secado de grano del sector agrícola.

1.7.1. Variable Independiente.

• Secado de granos.

MANIFESTACIÓN	CATEGORÍA	INDICADOR	ITEMS	TÉCNICA
El secado es un proceso sencillo "elevar la temperatura de un producto que contiene agua para que esta se evapore y desaparezca"; entre más alta sea la temperatura que se aplique tanto más rápidamente desaparecerá la humedad, pero para que el vapor desaparezca es necesaria que exista una corriente de aire para que lo transporte a la atmosfera.	Humedad de los granos y del aire. Humedad en base húmeda y en base seca.	Niveles de medición de la humedad de granos y del aire. % de humedad en base húmeda y seca.	¿Conoce cuál es la humedad permisible en los distintos tipos de granos? ¿Tiene referencia usted respecto a la humedad en base húmeda y en base seca?	Encuesta a docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Manabí.

1.7.2. Variable Dependiente.

• Simulación CFD.

MANIFESTACION	CATEGORÍA	INDICADOR	ITEMS	TECNICA
La CFD se define como la técnica informática que busca la simulación del movimiento de los fluidos. Es una rama de la mecánica de fluidos que emplea métodos numéricos y algoritmos para analizar y resolver los problemas que implican a los flujos de los fluidos. Comprende una gran variedad de ciencias, como las matemáticas, la informática, la ingeniería o la física, las cuales van a trabajar conjuntamente para proporcionar los medios para modelar	La simulación digital. Modelado teórico del funcionamiento del secador solar.	Niveles de conocimiento a través de las técnicas de simulación digital Parámetros aplicados al modelo teórico a través de la simulación CFD.	¿Posee usted conocimiento respecto a los tipos de técnicas de simulación digital? ¿Conoce cuál es la importancia de la simulación CFD y su incidencia en el mundo real?	Encuesta a docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Manabí.

1.8. Visualización del alcance del estudio.

La presente investigación en colectores solares de placa plana con tiro forzado se aplica mediante una simulación CFD donde se proyecta elevar la eficiencia en estos dispositivos obteniendo un fluido con una mayor cantidad de calor a la salida del colector, para que se pueda aprovechar en diversos procesos como en el secado de algún producto accediendo a conocimientos de la realidad social, y optar por mejorar la deshidratación de estos, y reducir la contaminación producida por las secadoras que usan combustibles no renovables.

Se empleará un tipo de investigación de campo en donde los métodos, técnicas e instrumentos de recopilación de datos que se utilizarán buscan adquirir información de vital importancia, por cuanto al simular digitalmente y estudiar un diseño de colectores solares placa plana de aire con tiro forzado. Los aportes con los que el presente trabajo de titulación contribuye son social, económico e investigativo.

1.8.1. Aporte en lo Social.

Basado en las deducciones de los beneficios y ventajas que tendrá la simulación CFD de un colector solar placa plana de aire con tiro forzado, podemos decir que su impacto será de gran importancia. Las consecuencias de la utilización de energía solar proporcionan al ambiente un enorme beneficio, primero la disminución de emisiones de gases contaminantes como el dióxido de carbono, dióxidos de azufre u óxidos de nitrógeno, consecuentemente pues al generarse una menor proporción de lluvias acidas se deja de contaminar aguas y suelos, que, al no estar contaminados, su flora y fauna respectiva se ve beneficiada, todo esto ayudando finalmente a nuestro planeta.

El colector solar placa plana de aire con tiro forzado, es una tecnología que beneficia y aumenta la producción de secado de diversos granos que por lo general lo realizan por el método tradicional directamente expuesto al sol y en máquinas secadoras que utilizan combustibles fósiles.

Al realizar una simulación CFD se crea una representación para investigar la realidad con el fin de promover un diseño acorde a las exigencias técnicas del agro y por el grado de humedad en las diferentes variedades de productos a secar, llegando así a utilizar energía renovable, establecer tiempos determinados para el secado y aumentar la eficiencia del mismo.

1.8.2. Aporte en lo Económico.

La Simulación CFD de un colector solar placa plana de aire con tiro forzado para elevar la eficiencia en el proceso de secado de granos en el sector agrícola tendrá un aporte económico ya que al lograr elevar la eficiencia en estos dispositivos se logra aprovechar una deshidratación más rápida en los diversos tipos de productos secando una mayor cantidad de estos en menor tiempo y así obtener una mejor calidad y más ingresos.

Por otro lado, esta investigación aportará en reducir egresos en combustibles fósiles ya que se aprovechará la energía del sol para el funcionamiento del colector solar de placa plana con circulación forzada, así mismo permitirá reducir el espacio en pistas de secado donde se exponen directamente al sol los productos a ser deshidratados, de esta manera se podrán usar estas pistas con otros fines económicos para un mejor desarrollo.

1.9. Objetivos.

1.9.1. Objetivo General.

Desarrollar una simulación CFD de un colector solar placa plana de aire con tiro forzado para elevar la eficiencia en el secado de granos en el sector agrícola.

1.9.2. Objetivos Específicos.

- Determinar la transferencia de calor útil en el colector solar de aire.
- Optimizar los parámetros térmicos y geométricos del colector solar mediante la simulación CFD.
- Determinar la eficiencia exergética del colector solar modelado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. Energía solar.

La energía solar es la energía radiante producida en el sol como resultado de reacciones nucleares de fusión que llegan a la tierra a través del espacio. La energía radiante del sol proporciona excedentes de calor que superan con creces el suministro actual de energía. (Tous, 2009).

Los beneficios del uso de la energía solar se cuestionan a continuación:

a) Económicos:

- Recurso gratuito.
- Largo periodo de vida de equipos.
- Tiempo de recuperación de la inversión relativamente corto.
- Creación de empleos.
- Ahorros económicos significativos.

b) Energéticos:

- Recurso inagotable.
- Reemplazo de otras fuentes de energía agotables y contaminantes como combustibles fósiles o nucleares.
- Diversificación del portafolio energético del país.

c) Ambientales:

- No contamina.
- No genera emisiones de CO2.

d) Otros beneficios:

- Fácil de instalar.
- Tecnología madura y confiable.

• No genera ruido.

La energía solar está en función de la intensidad de radiación que recibe el planeta, es decir, entre mayor radiación, mayor será la energía. (Soto, 2016).

2.1. Aprovechamiento de la energía solar en el mundo

El aprovechamiento de la energía del sol está condicionado por la intensidad de radiación que se recibe en la tierra, o en términos más sencillos; entre más fuerte pega el sol en la tierra, más energía se puede aprovechar. La potencia de la radiación varía según la latitud del lugar, el momento del día, las condiciones atmosféricas y climatológicas (por ejemplo, nubes) y la altitud. (Lang, 2014)

La energía solar se puede aprovechar mediante diversas tecnologías y dispositivos con el fin de generar electricidad o calor:

- Colectores solares que transfieren el calor del sol a un fluido (energía térmica).
- Plantas térmicas solares que generan energía eléctrica a través de calor y vapor (energía térmica).
- Paneles solares que generan energía eléctrica (energía fotovoltaica).
- Hornos o estufas solares para calentar comida o esterilizar materiales.

El consumo mundial de energía solar se incrementó en un 38,2% durante el año 2014, registrando un total de 185,9 TWh, frente a los 134,5 TWh del año 2013, según lo indican las estadísticas de la petrolera BP.



Figura 2.1: consumo de la energia solar en el mundo en Twh en 201 **Fuente:** ECOPOST (Periodismo, Periodismo, Sostenibilidad)

El país que lideró este consumo fue Alemania, con 34,9 TWh lo que representa un 19% del total mundial de energía solar consumida. Le siguen China, con 29,1 TWh y un 16% del consumo e Italia, con 23,7 TWh y el 13% del total. Japón, Estados Unidos y España se ubicaron en cuarto, quinto y sexto lugar, con el 11%, 10% y 7% del consumo mundial, respectivamente. Otros países que también muestran potencia en esta energía renovable son Francia, Grecia, Australia y Reino Unido.

2.2. Aprovechamiento de la energía solar en el Ecuador

El Ecuador se traduce en la recepción de una constante y mayor cantidad de radiación solar que varía dentro del territorio ecuatoriano debido solamente a condiciones climatológicas y geográficas locales (por ejemplo, altura sobre el nivel del mar o presencia de nubosidad).

Tener esta información es un aporte en el momento de implementar procesos productivos tecnológicamente eficientes en sectores como el agrícola e industrial que impliquen el aprovechamiento de energía solar por ejemplo en sistemas de bombeo, molienda de granos, autoconsumo, iluminación, generación de calor, regulación de temperaturas, etc.; todo esto mediante energías limpias y con condiciones de ventaja estratégica para el país por su ubicación geográfica. (Reinoso, 2014).

La insolación es la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar de la Tierra en un día concreto (insolación diurna) o un año (insolación anual). (wikipedia, 2016).

PROVINCIA	VALOR MÍNIMO (W/m²día)	VALOR MÁXIMO (W/m²día)	VALOR MEDIO (W/m²día)
Azuay	4100	5930	5015
Bolívar	3560	5040	4300
Cañar	3850	5050	4450
Carchi	3330	4750	4040
Cotopaxi	3650	4980	4315
Chimborazo	3880	5150	4515
El Oro	4100	5930	5015
Esmeraldas	3280	5100	4190
Guayas	3560	5040	4300
Imbabura	3330	4750	4040
Loja	4100	5930	5015
Los Ríos	3560	5040	4300
Manabí	3890	5960	4925
Morona Santiago	3190	4480	3835
Napo	3410	4570	3990
Pastaza	3610	4960	4285
Pichincha	3650	4980	4315
Orellana	3440	4930	4185
Tungurahua	3880	5150	4515
Santa Elena	4340	6410	5375
Santo Domingo	3230	4890	4060
Sucumbíos	3180	4510	3845

Tabla 2.1. Insolación global promedio anual por Provincia. **Fuente:** Observatorio de la Nasa

La radiación electromagnética proveniente del sol cubre un espectro muy amplio de longitudes de onda. Cuando la radiación solar penetra la atmosfera terrestre, es absorbida y difundida. Solamente la radiación de grandes longitudes de onda alcanza las capas inferiores de la atmosfera mientras que únicamente el espectro conocido como rango de la energía solar, con límites de longitud de ondas entre 0.3 y 4 μm , puede ser empleado en usos prácticos.



Diagrama 2.1. Radiación solar y sus componentes directa y difusa. **Fuente:** Energíe Solaire

2.3. Radiación directa y difusa en la tierra

2.3.1. Radiación directa.

Se conoce como radiación directa, a la radiación recibida del sol sin que haya sido absorbida ni dispersada. La radiación solar que se mide fuera de la atmosfera es en su totalidad radiación directa, ya que no hay presencia de cuerpos o fenómenos que modifiquen su trayectoria.

Se conoce a la radiación directa a las relaciones geométricas entre un plano y cualquier orientación particular relativa a la tierra en cualquier momento y la radiación solar directa incidente.

$$I_{Dhc} = I_0 e^{-016 - 0.22 \cdot m} \operatorname{sen}(\beta) \quad W/m^2$$
 EC. (2.1)

Donde:

- I_0 = Constante solar
- **m** = Masa del aire
- $\boldsymbol{\beta}$ = Altura solar

Radiación directa promedio anual

Ecuador: 2420 W/m²día
Manabí: 2553 W/m²día
Portoviejo: 2550 W/m²día

2.3.2. Radiación difusa.

Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de 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. (ekilokitos, 2009).

$$I_{dhc} = 160 \left(sen(\beta) \right)^{0.8} (1.0 - 0.43 \, sen \, \delta) \qquad W/m^2 \qquad \text{EC.} (2.2)$$

Donde:

 $I_{dhc} = Radiacion difusa dobre plano horizontal, cielo claro$

2130 $W/m^2 dia$

 δ = Declination solar

Ecuador:

Radiación difusa promedio anual

> Manabí: $2080 W/m^2 dia$ Portoviejo: $2080 W/m^2 dia$

Radiación promedio global



Figura 2.2. Máxima radiación directa en el Ecuador Fuente: Atlas solar del Ecuador
2.4. Constante solar

La constante solar es el nombre dado por la cantidad de energía radiante proveniente del sol que cae en una unidad de tiempo (1s) sobre una superficie perpendicular a los rayos solares en un punto exterior a la atmosfera.

Es el flujo de energía proveniente del sol que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a una distancia media de la tierra al sol fuera de la atmosfera.

Siguiendo la norma adoptada por la referencia radiométrica mundial el valor actualmente aceptado y más confiable para la constante solar I_0 es de 1.370 W/m^2 .

2.5. Posición relativa sol-tierra

El análisis de la posición del sol respecto de una superficie cualquiera ligada a la tierra precisa la elección de un sistema de referencia, para lo cual se elige un sistema inercial con origen en el punto de la superficie terrestre donde se encuentra el observador.

2.6. Angulo horario a la salida del sol

2.6.1. Altura solar, β .

Ángulo formado por un rayo de sol directo y el plano horizontal.

2.6.2. Ángulo cenital solar.

Ángulo formado por el rayo solar y la normal a la superficie, es decir, el ángulo complementario a la altura solar. Se suele denominar también distancia cenital.

2.6.3. Acimut.

Ángulo que forma la línea norte-sur con la proyección del rayo solar en el plano horizontal. El signo positivo o negativo de este ángulo depende de si se avanza hacia el oeste de sur o hacia el este del sur. Las interpretaciones son diversas.

La diferencia entre hora solar y hora civil la hora solar es cuando el sol pasa por el plano que contiene el meridiano del lugar, es decir, coinciden con el cenit (recta imaginaria que une el centro de la tierra con el observador en la superficie), en lo cual se llama mediodía solar.

La hora oficial local correcciones respecto de la hora solar, que incluyen:

- a) La diferencia de meridianos sobre los que se encuentran el observador y el que se usa como referencia para la hora oficial.
- b) La llamada ecuación del tiempo, que corrige el efecto de las perturbaciones en la velocidad de la tierra y el sol
- c) La corrección artificiosa atendiendo a consideraciones de ahorro energético.

La radiación procedente del sol está integrada por diferentes longitudes de onda, por lo que es útil conocer, además de la constante solar, la distribución espectral de esta. El espectro de radiación incluye longitudes de onda (λ) que van de 0.28 a 5 μm , que se suelen dividir en tres regiones importantes para el aprovechamiento energético:

- Ultravioleta: $\lambda < 0.4 \, \mu m$
- Visible: $0.4 < \lambda < 0.76 \, \mu m$
- Infrarroja: $\lambda > 0.76 \, \mu m$

Cabe destacar que, aunque el pico de mayor intensidad de radiación corresponde a la zona visible, la mitad de la energía solar emitida es de radiación infrarroja. (Tous, 2009).

2.6.4. Latitud (*L*):

La localización de la ciudad de Portoviejo tiene una Latitud de -1.05 Sur y una Longitud es de -80.45 Oeste.

2.6.5. Declinación (δ):

La posición angular del sol en el mediodía solar con respecto al plano del ecuador norte positivo: $-23.45^{\circ} \le \gamma \le 23.45^{\circ}$.

2.6.6. Inclinación (*i*):

El ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal; $0 \le \beta \le$ 180.

2.6.7. Angulo acimut de superficie(γ):

La desviación de la proyección sobre un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local, con cero al sur, negativo al este, positivo al oeste; $-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$.

2.6.8. Angulo horario (ω):

El desplazamiento angular del sol este a oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre un eje a 15° por hora; negativo en la mañana, positivo por la tarde.

2.6.9. Angulo de incidencia (θ):

El ángulo entre el rayo directo sobre una superficie y la normal a esa superficie, (Guisan, 1989).



Figura 2.3: Ángulos Horarios. Fuente: Paneles Solares Pr

2.7. Radiación solar sobre un plano horizontal.

$$I_{0h} = I_0 sen(\beta)$$
 EC. (2.3)

Para calcular la radiación solar diaria sobre un plano horizontal empleamos la siguiente ecuación.

$$H_{0h} = \int_{t_s}^{t_p} I_0 \operatorname{sen}(\beta) dt \qquad \text{EC. (2.4)}$$

Dónde:

$$S = salida del Sol,$$

P = puesta del Sol,

Alternativamente:

Dónde:

 ω = angulo horario (AH)del Sol en radianes

$$\frac{dt}{d\omega} = \frac{24h}{2\pi} = 24 \times 3600/2\pi(s)$$

De lo cual obtenemos las siguientes relaciones:

$$sen(\beta) = sen(L).sen(\delta) + cos(L).cos(\delta).cos(\omega)$$
$$cos(\omega_s) = -tan(L).tan(\delta)$$
EC. (2.6)

Entonces, para cualquier día del año (conocemos la declinación δ correspondiente), y para cualquier latitud *L* podríamos calcular la radiación para cualquier plano horizontal con la siguiente formula:

$$H_{0h} = \frac{24 \times 3600}{\pi} I_0 \cos(L) \cdot \cos(\delta).$$

$$[sen(w_s) + w_s \tan(L) \cdot \tan(\delta)] \qquad \text{EC. (2.7)}$$

2.8. Radiación solar sobre un plano inclinado.

Sobre un plano inclinado cualquiera i, caracterizado por su normal n_i , tenemos:

$$I_{0i} = I_{0h}.\cos(\alpha)$$
 EC. (2.8)

$$I_{0i} = I_{0h} \cdot \frac{\cos(\alpha)}{sen(\beta)}$$
 EC. (2.9)

La radiación sobre un plano de orientación cualquiera, definido por su inclinación *i* con respecto a la horizontal y por su orientación acimutal con respecto al norte (c positivo hacia el este), se calculará con la siguiente ecuación.

Donde:

 $\omega_i y \omega_z$ representan la salida y puesta del sol sobre el plano inclinado (i)

α = angulo entre los rayos solares

Con el objetivo de obtener una expresión integrable, perseguimos con el método de las superficies equivalente (L_e) .La radiación solar sobre un plano *i* se define por:

$$I_{0i} = I_0[sen(L_e).sen(\delta) + cos(L_e).cos(\delta).cos(\omega - d)]$$
 EC. (2.11)

Esto resulta de la relación por la descomposición vectorial en el plano A, la cual nos permite deducir la superficie equivalente (L_e) y el desfase de longitud de cualquier ángulo solar (d).

$$H_{0i} = \frac{24*3600}{\pi} I_0 \cos(L_e) \cdot \cos(\delta) \cdot [sen(w_z - d) - sen(w_i - d) + (w_z - w_i) \cdot \cos(w_{se})] \cos(w_{se}) = -\tan(L_e) \cdot \tan(\delta) \quad \text{EC.} (2.12)$$

Por tanto

 $w_{se} = angulo horario de salida/puesta del sol sobre la superficie equivalente$

De esta forma podemos calcular analíticamente la radiación solar fuera de atmosfera I_{0i} , así como su integral diaria H_{0i} sobre cualquier plano *i* (de inclinación *i*, acimut *c*), para cualquier día del año y para toda latitud, (Fundamentals, 1989).

2.9. Transmisión de la radiación solar a través de una atmosfera clara

Si bien es cierto que los días despejados no son representativos de todas las condiciones meteorológicas. La transmisión atmosférica para cielo claro es más fácil de entender que para las demás condiciones. La transmisión para cielo claro además impone la radiación solar máxima que se puede esperar al nivel del suelo, dando de esta manera límites precisos y útiles para diferentes situaciones, (Tous, 2009).

2.10. Exergía de la radiación solar

La energía solar proviene de la fusión nuclear que se produce en el núcleo solar, en donde las temperaturas superan los 10 millones de grados Celsius. Esta energía se propaga primero hacia la superficie del Sol donde las temperaturas aún son de 6000°C, luego en el sistema solar en forma de radiación electromagnética.

La energía solar es la principal fuente de energía que calienta la superficie terrestre. Cada día, el Sol nos envía una cantidad considerable de energía: en un año, la humanidad entera consume menos del 3% de lo que el Sol nos envía diariamente. En promedio, en la superficie terrestre (incluyendo día y noche, invierno y verano, trópicos y polos), el Sol envía 342 Vatios por metro cuadrado a nivel de la alta atmósfera. Un 30% de esta energía se devuelve, reflejado, al espacio, (el clima de la tierra, 2006).

La Exergía que recibimos del sol, a una temperatura equivalente de unos 6700°K, constituye aproximadamente el 95,5% de su energía con respecto a la temperatura ambiental media de 300° K, y es la que se puede aprovechar como trabajo útil.

2.11. Modelos exergéticos de la radiación solar

Los distintos modelos parten de considerar un esquema bastante general compuesto por una máquina térmica cíclica colocada en la superficie terrestre, tal como está representada en la Figura 2.4. Dicha máquina produce el trabajo máximo por unidad de tiempo (la potencia máxima) \dot{w}_{max} que puede ser obtenido del flujo de energía solar proveniente de la fuente, \dot{e}_s y la misma rechaza el flujo de calor \dot{q}_0 al medio ambiente a la temperatura T_0 . De acuerdo a los diferentes modelos la máquina pudiera o no emitir un flujo de energía por radiación al exterior \dot{e}_s .



Figura 2.4. Esquema del sistema empleado por los diferentes modelos para obtener la Exergía de la radiación solar.

La potencia máxima \dot{w}_{max} producida por dicho motor, es el flujo de exergía de la radiación solar correspondiente al flujo de energía solar \dot{e}_s . En la figura 2.4 también han sido colocados los flujos de entropía que acompañan a cada flujo energético.

2.11.1 Modelo de Petela

El modelo de Petela se apoya en la figura 2.4. En el mismo se asume, al igual que lo hizo Spanner, que la energía solar que alcanza el sistema de la Figura 2.4 es un flujo de radiación. Además, se asume en el modelo de Petela, como elemento esencial, que el sistema no puede recibir radiación sin emitir energía radiante a la temperatura ambiente T_0 .

El balance de energía del convertidor para este caso resulta: $\dot{e}_s - \dot{w}_{max} - \dot{e}_o - \dot{q}_o = 0$ y el balance de entropía queda: $\dot{s}_s - \dot{s}_o - \dot{q}_o/T_o = 0$. Sustituyendo el calor del balance de entropía en el balance energético se tiene:

$$\dot{w}_{max} = (\dot{e}_s - T_o \dot{s}_s) - (\dot{e}_o - T_o \dot{s}_o) = 0$$
 EC. (2.13)

Si como expresa la segunda asunción, se considera que el convertidor es un emisor negro a T_o , entonces.

$$(\dot{e}_o - T_o \dot{s}_o) = \sigma T_s^4 - T_o \left(\frac{4}{3}\sigma T_s^3\right) = -\frac{1}{3}\sigma T_s^4$$
 EC. (2.14)

Combinado este resultado con el de Spanner se tiene que la exergía es:

$$\dot{e}_{xs} = \dot{w}_{max} = \sigma T_s^4 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_s} + \frac{1}{3} \frac{T_o^4}{T_s^4} \right)$$
 EC. (2.15)

El rendimiento o factor de exergía queda:

$$n_P = \dot{e}_{xs} / \dot{e}_s = \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_s} + \frac{4}{3} \frac{T_o^4}{T_s^4}\right)$$
 EC. (2.16)

2.12. Colectores solares.

Un colector solar es aquel que convierte la energía del solar que incide en otra forma de energía útil. Difiere de un intercambiador de calor común ya que en éstos efectúan intercambios térmicos entre fluidos con altos coeficientes de transferencia térmica, y en los que la radiación es un factor que no es de mucha importancia; en un colector solar, la transferencia térmica se formaliza desde una fuente energética, en este caso el Sol, a un fluido, sin acumulación de energía solar.

La principal aplicación de los colectores solares de aire es para el secado de productos. Ya que para el secado de productos agrícolas se necesita una cantidad de energía muy precisa, y que la energía suministrada por los captadores depende de las condiciones climáticas, la instalación solar se combinará con la instalación de energía convencional. (Martín C, 2012, pág. 63)

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 a continuación 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	Rendimiento óptico. (%)	Factor de pérdidas térmicas. (W/m²ºK)	Rango de temperaturas. (°C)
Sin cubierta	90	15-25	10-40
Cubierta simple	80	7	10-90
Doble cubierta	65	5	10-90
Tubos de vacío	70	2	10-130

Tabla 2.2. Parámetros característicos de los distintos colectores solares.

 Fuente: CENSOLAR.

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 transitorias. (Larrea G, Bayas H, 2011, págs. 19-20)

2.12.1. Colector solar placa plana de aire con tiro forzado.

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 ventilar, pero este es un elemento aparte.

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 al ambiente de inicio. 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. (Varea A, 2007, págs. 2-14)

Estos colectores presentar una muy aceptable relación en cuanto al precio y a la calidad, además poseen una extensa gama de medios para su ensambladura.



Figura 2.5. Radiación en un colector solar placa plana de aire.

2.12.2. Características de los componentes del colector solar de aire tiro forzado.

En referencia a la tecnología de la energía solar fototermica 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 el de colectar la mayor cantidad de energía solar disponible de forma ideal al menor costo total permitido. Además, influye el criterio de uso que se requiera ya sea para trabajos que demandas 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 componentes del colector solar de aire se muestran en la figura 2.6. Siendo: 1. Carcasa, 2 Cubierta, 3. Placa absorbedora, 4. Aislante.



Figura 2.6. Componentes de un colector solar placa plana de aire.

2.12.2.1. Carcasa del colector.

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, las principales características 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.

A continuación, se muestra en la tabla 2.3 los diversos materiales con los que puede ser construida la carcasa del colector solar, se indican valores respectivos de las principales propiedades que se deben tomar en consideración al momento de seleccionar el material adecuado para la construcción.

Material	Densidad (kg/m3)	Calor específico (J/kg·K)	Conductividad térmica (W/(m·K))
Acero Galvanizado	7850	460	58
Aluminio	2700	909	232
Zinc	7140	389	140
Madera	840	1381	0,13
Yeso	1800	837	0,81

 Tabla 2.3. Materiales y principales propiedades a considerar en la construcción de la carcasa de colectores solares placa plana.

Por lo general la carcasa del colector solar placa plana se fabrica en acero galvanizado, aluminio y madera. En elaboración de este trabajo de titulación se va a utilizar el acero galvanizado (plancha de 1/20 pulgadas) 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 fabulosas, idóneas para ambientes exigentes. (Terol D, 2011)

2.12.2.2. Cubierta transparente.

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.

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)	Conductividad térmica (W/m·K)	Transmisión luminosa (%)
Vidrio	2700	833	0.81	94
Policarbonato	1200	1200	0.19 – 0.22	87
Acrílico	1180	1465	0.21	92

En la tabla 2.4 que se observan materiales de cubiertas trasparentes con sus principales propiedades. Estas son usadas en colectores solares de placa plana.

 Tabla 2.4. Materiales y principales propiedades a considerar en la selección de la cubierta transparente de colectores solares placa plana.

Se selecciona el vidrio (6 mm) como la cubierta transparente a utilizar en el colector solar placa plana ya que a nivel mundial es el principal material utilizado actualmente, ya 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 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 G, Bayas A, 2011, pág. 34)

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 índice de refracción varía desde 1.52 a 1.66, su absortancia de onda corta esta entre 0.4 a 0.70 y su emitancia de onda larga es de 0.84.

Las láminas de policarbonato y capas de acrílico también poseen una alta transmitancia a la onda corta. Sin embargo, estos materiales tienden a ser de mayor costo lo cual no sería rentable al ser usados al por mayor. Algunos tipos de plásticos transparentes flexibles se usan con poca frecuencia ya que no pueden permanecer largos periodos intactos frente a la radiación ultravioleta solar y demás factores internos y externos. (Rodríguez H, 2012, pág. 41)

2.12.2.3. Placa absorbedora.

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.

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, por lo tanto, han de elegirse correctamente los materiales y pinturas (es recomendable negra mate sintético con un coeficiente de absorción de 0.97, una emisividad de 0.92 y una reflectividad del 3%) con el fin a destacar 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 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. El 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 µm. Estas radiaciones deben limitarse lo máximo posible para mantener una temperatura alta en el absorbedor. 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. (Martín C, 2012, pág. 65)

En la tabla 2.5 se muestran varios materiales que pueden ser utilizados al momento de seleccionar la placa absorbedora para el colector solar placa plana.

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)	Conductividad térmica (W/m·K)
Acero Galvanizado	7850	460	58
Aluminio	2700	909	232
Zinc	7140	389	140
Cobre	8900	389	385
Acero Inoxidable	7980	510	45

 Tabla 2.5. Materiales y principales propiedades a considerar en la selección de la placa absorbedora de colectores solares placa plana.

El material elegido para formar parte del colector solar como la placa absorbedora fue el acero galvanizado (plancha 1/16 pulgadas) ya que posee propiedades térmicas acordes a requisitos según normas estandarizadas de colectores solares placa plana, además es un material económico, resistente a la oxidación, duradero y amigable para el ambiente.

Por otra parte, materiales como el aluminio y zinc no son muy usados como placa absorbedora ya que con el tiempo tienden a ser víctima de corrosión, no son tan duraderos y requieren de mantenimientos constantes para evitar un rápido deterioro.

El cobre y el acero inoxidable son muy buenos materiales (destacando el cobre como uno de los mejores conductores de calor) son muy duraderos y son resistentes a condiciones ambientales y extremas, pero son descartados de uso como placa absorbedora ya que no son rentables por su elevado costo.

2.12.2.4. Aislamiento del colector solar de aire.

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 como aislantes se muestran en la tabla 2.6 a continuación:

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)	Conductividad térmica (W/m·K)
Espuma de poliuretano	40	1674	0,029
Lana de vidrio	100	-	0.032
Poliestireno expandido	25	1674	0.034
Serrín	215	-	0.071
Madera	840	1381	0.13

 Tabla 2.6. Materiales y principales propiedades a considerar en la selección del aislante para colectores solares placa plana.

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 y mantener un bajo coeficiente de conductividad.

El material seleccionado como aislante es el poliestireno expandido, 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, su cualidad más apreciable es su higiene al no constituir sustrato nutritivo para microorganismos por lo cual no se pudre, no se descompone, ni se enmohece convirtiéndolo en un material idóneo para diversas aplicaciones como: aislante térmico para temperaturas desde -200°C hasta 100°C, resistente a la humedad, alta capacidad de absorción de los impactos, etc. Cabe destacar que es un material económico al alcance de todos, su duración es indefinida si se la protege debidamente, ya que es 100% reutilizable y su degradación puede tardar desde varios meses hasta más de 400 años.

Por otra parte, materiales como la madera o serrín son también muy buenos aislantes térmicos, pero se descartaron por diversos factores como: descomposición más rápida al ser materia natural, propensos a adquirir insectos, hongos y bacterias, no resisten exceso de humedad y su facilidad de instalación es un poco más compleja.

La lana de vidrio siendo un buen aislante térmico, no se lo tomó en consideración ya que puede causar que la piel adquiera picazón e incomodidad causando irritaciones además con el tiempo, tiende a establecerse y reducir su tamaño. Mientras que la espuma de poliuretano también fue descartada por ser muy sensible a los rayos ultravioleta y demás agresiones directas con el medio ambiente lo que causa que con el tiempo pierdas sus propiedades y se desprenda en pequeños pedazos donde se encuentre adherida. Resulta altamente nocivo para la salud si se lo expone al fuego.

2.13. Circulación forzada del colector solar de aire.

En la circulación forzada en el colector solar el fluido caloportador es desplazado por un ventilador que consume energía eléctrica. 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 que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica para el ventilador. (AGROWASTER, 2013, pág. 2)

En 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.



Figura 2.7. Clasificación de ventiladores axiales

Los ventiladores centrífugos sirven para las presiones estáticas elevadas. Calientan más el aire porque se aprovecha la energía que libera el motor eléctrico. Se componen 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.

Las clasificaciones de álabes más usados en este tipo de ventiladores se pueden apreciar en la figura 2.8.



Figura 2.8. Clasificación de álabes en ventiladores centrífugos. **Fuente:** Varea A, 2007

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. (Varea A, 2007, págs. 20-21)

Ventilador	Presión	Partículas	Ubicación	Corrosión	Costo	Caudal
v chinauor	KPa	-	-	-	\$	m ³ /s
Axial	Menor	Igual	Igual	Mayor	Mayor	Menor
Centrífugo	Mayor	Igual	Igual	Menor	Menor	Mayor
Table 27 Frankrasián del sentile den none el colector solar de sine						

Tabla 2.7. Evaluación del ventilador para el colector solar de aire.

2.14. Variables térmicas del colector solar de aire.

Las variables constituyen una parte esencial en el funcionamiento del colector solar de aire, por lo general la temperatura ambiente a diversas horas, la radiación del sol y el viento son aquellos factores que se deben considerar al momento de analizar las variables térmicas que con base a estudios se han destacado entre las principales la densidad del aire, el calor específico del aire, el número de Reynolds para caracterizar el movimiento de un fluido (laminar o turbulento) y el número de Nusselt para la determinación de la transferencia de calor por convección.

En la figura 2.9 se aprecia los diversos factores que tienden a generar las variables térmicas en un sistema solar térmico.



Fig. 2.9. Variables térmicas que intervienen en un sistema solar térmico.

2.14.1. Densidad del aire.

El aire es la mezcla homogénea de gases que compone la atmósfera terrestre, que permanecen alrededor del planeta Tierra por acción de la fuerza de gravedad, posee una densidad que es la cantidad de masa de aire por unidad de volumen.

Uno de los factores que se deben tomar en consideración es que, según la altitud y la humedad, la densidad tiende a variar, el aire es más denso cuando hace frio que cuando hace calor. Entonces a medida que ascendemos en la atmosfera la densidad, la temperatura y la presión del aire disminuyen.

En la tabla 2.8 se aprecian propiedades del aire como presión, temperatura, velocidad, y densidad con referencia a la latitud -1.05 Sur y longitud -80.45 Oeste de la ciudad de Portoviejo donde se ejecuta la presente investigación. Dichos datos se tomaron mensualmente con un promedio de los últimos 20 años y se los obtuvieron de la página oficial de la NASA. Así mismo se muestra el valor anual medio de cada propiedad del aire.

Meses	Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	Presión Atm (KPa)	Densidad (Kg/m ³)
Enero	24.9	2.67	97.7	1.1842
Febrero	25.2	2.35	97.7	1.1825
Marzo	25.0	2.20	97.7	1.1839
Abril	25.3	2.19	97.7	1.1828
Mayo	25.4	2.37	97.7	1.1831
Junio	25.1	3.05	97.8	1.1835
Julio	25.0	3.19	97.8	1.1839
Agosto	25.0	3.25	97.8	1.1839
Septiembre	24.9	3.07	97.8	1.1842
Octubre	24.7	3.05	97.8	1.1877
Noviembre	24.2	3.05	97.8	1.1881

Diciembre	24.6	2.91	97.8	1.1875
Valor anual medio	24.9	2.78	97.8	1.1842

Tabla 2.8. Propiedades del aire durante los 12 meses con un promedio de los últimos 20 años en laciudad de Portoviejo.Fuente: NASA.

2.14.2. Calor específico del aire.

El calor específico es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia, esta propiedad intensiva no depende de la materia. Se pueden definir dos tipos de calor específicos que son a presión constante ya volumen constante. El calor específico del aire que se va a usar es a presión constante ya que la investigación se realiza en la cuidad de Portoviejo que mantiene casi constante su presión atmosférica, donde su valor anual medio con un promedio de 20 años es de 97.8 KPa (tabla 2.8).

Por lo general el aire es considerado como un gas ideal y de acuerdo a cambios de temperatura el calor específico tiende variar diminutamente, en la mayoría de los casos siempre se utiliza un valor medio de 1.005 J/ (kg °K) el cual es aceptado a nivel mundial para efectuar cálculos y experimentaciones.

2.14.3. Número de Reynolds.

El Número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional cuyo valor caracteriza si un flujo se encuentra en modelo laminar o si ha cambiado a modelo turbulento. Reynolds determina las relaciones entre las fuerzas inerciales o convectivas y las fuerzas viscosas presentes en el fluido.

En el colector solar plano si el fluido es laminar este se desplaza en capas una sobre otra por lo que se dificulta la transferencia de calor por convección desde la placa colectora por la baja conductividad térmica del aire, mientras que si es turbulento el fluido se desplaza de una manera desordenada, facilitando que porciones del fluido se contacten con la placa y se calienten de una manera más útil.

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 , (figura 2.10).

$$R_e = \frac{p * v * D_c}{\mu}$$
 EC. (2.17)

Donde:

 $p = Densidad del aire (Kg/m^3)$

 $D_c = Longuitud equivalente (m)$

v = Velocidad del aire (m/s)

 $\mu = Viscocidad del aire (N s/m^2)$



Figura 2.10. Flujo paralelo sobre placa plana en ducto rectangular

Si la transición en el ducto rectangular el número de Reynolds es menor de 2400 el flujo es laminar, si es mayor de 2700 el flujo será turbulento y para valores comprendidos entre 2400 < Re < 2700 se le considera zona crítica o de transición.

2.14.4. Número de Nusselt.

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 comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

$$N_u = \frac{h \cdot D_c}{k}$$
 EC. (2.18)

Donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m² °K)K = Conductividad termica del aire (W/m °K)

Acatando del valor de Reynolds tendremos flujo laminar o turbulento.

Para el obtener el Número de Nusselt, aplicamos la correlación de Hilpert que se muestra en la ecuación 2.19.

$$N_u = \frac{h D}{K} = C R_e^m P r^{\frac{1}{3}}$$
 EC. (2.19)

Donde:

- $N_u = N$ úmero de Nussetl.
- c = 0.228, contante de la ecuación para ducto rectangular.
- m = 0.731, contante de la ecuacion para ducto rectangular.
- $R_e = N$ úmero de Reynolds.
- Pr = Número de Prant .

2.15. Variables geométricas del colector solar de aire.

Las variables geométricas son la relación de las dimensiones del colector solar placa plana. Las medidas más comunes utilizadas a nivel global dependen de la aplicación que se demande para un mejor trabajo. Se muestran en la tabla 2.9.

Aplicación	Uso de colectores	Dimensiones (cm)		em)
	(%)	Largo	Ancho	Alto
Secado de granos.	60	200	150	5 - 10
Calefacción doméstica e industrial.	30	175	100	5 - 8
Experimentación y otros.	10	100 - 200	Largo/2	5 - 10

Tabla 2.9. Dimensiones más comunes de colectores solares a nivel global respecto a su aplicación.

En la presente investigación el tipo de colector solar plano de aire será de experimentación donde sus principales variables geométricas se identifican en la figura 2.11.



Figura 2.11. Variables geométricas en el colector solar de aire.

En la tabla 2.10 se aprecia de manera específica las dimensiones relacionadas a las variables geométricas del colector solar placa plana tomando en consideración cada componente que constituye el mismo.

Componente en el colector solar de aire	Dimensiones (cm)			
componente en el colector solar de une	Largo	Ancho	Alto	
Cubierta Transparente.	160	80	0.60	
Carcasa sin sección conica (ancho total).	160	85.25	15.88	
Espacio del aire.	160	80	7.50	
Placa absorbedora (ancho útil).	160	80	0.15	
Aislante inferior.	160	85	7.50	
Aislante laterales.	160	2.50	7.50	

Tabla 2.10. Dimensiones del colector solar placa plana para la presente investigación

En un colector solar de aire con respecto a las dimensiones asignadas hay que tener presente tres aspectos importantes:

1.- 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 es la aprovechable (tabla 2.10) la cual tendrá una longitud de 160 cm y un ancho de 80 cm siendo esta un área $A_c= 1.28 \text{ m}^2$

2.- De acuerdo a valores estandarizados la separación entre la cubierta y el absorbedor varía entre 5 y 10 cm. En esta investigación se usa la separación de 7.5 cm.

3.- Hay que identificar que la esbeltez (Relación Largo/Ancho) sea menor a 2.5 para evitar comportamientos disparejos en las distintas zonas del colector solar placa plana. En este caso teniendo 160 cm de largo y 80 cm de ancho la esbeltez es de 2 siendo un valor aceptable.

Las dimensiones y demás valores geométricos del colector pueden variar de acuerdo a un diseño por requerimientos de eficiencia, las mismas pueden ser manipuladas con modelos de simulación CFD.

2.15.1. Inclinación del colector solar plano.

El ángulo de inclinación está dado por la latitud del lugar a emplear el dispositivo captador de energía solar más 10° como inclinación mínima o 16° 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°.05′ Sur. Empleando los parámetros nombrados anteriormente establecemos que la inclinación inicial para la investigación es de 17°, la que posteriormente puede variar según las condiciones de acuerdo a la simulación CFD.

En la figura 2.12 se representa gráficamente la inclinación y orientación del colector solar.



Figura 2.12. Identificación del ángulo de inclinación del colector solar plano.

2.16. Pérdidas de calor en el colector solar de aire.

Para poder conseguir un buen rendimiento en el colector solar uno de los aspectos de mayor importancia es el de reducir las pérdidas especialmente las térmicas.

En la figura 2.13 se pueden apreciar las pérdidas generalizadas y distribuidas dentro de un colector solar placa plana.



Figura 2.13. Pérdidas generales en el colector solar de aire.

La cantidad de energía perdida del colector, puede definirse en términos de la temperatura de trabajo del colector ΔT y de un coeficiente total de perdidas U_{Total} como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$Q_{Perd} = U_{Total} A_{abs} (T_{pp} - T_{Amb})$$
 EC. (2.20)

De donde:

 $U_{Toatal} = Coeficiente total de transferencia de calor (W/m² °K).$ $A_{Abs} =$ Área de la placa del colector solar plano (m²). $T_{pp} = Temperatura promedio de la placa absorbedora (°K).$ $T_{Amb} = Temperatura ambiente (°K).$

Las pérdidas térmicas de cualquier colecto solar presentan las tres formas de transferencia de calor: radiación, convección y conducción. Las pérdidas de calor por conducción tienen lugar en los laterales y en la cara trasera del absorbedor. Las pérdidas de calor por convección tienen lugar desde el absorbedor hasta la cubierta de cristal y pueden verse reducidas por el espacio de evacuación entre el absorbedor y la cubierta de

cristal y por la optimización del agujero entre ellos. Las pérdidas de radiación ocurren desde el absorbedor, debido a la temperatura de éste.

El coeficiente total de perdidas U_{Total} , en W/m2K, se puede hallar sumando las perdidas térmicas a través de la parte superior (cubierta), de la parte inferior y de los laterales del colector solar (aislante térmico), ver figura 2.14. Entonces se tiene que:

$$U_{Total} = U_{Inferior} + U_{Laterales} + U_{Superior}$$
 EC. (2.21)

De donde:

 $U_{Inferior} = Coeficiente total de transferencia de calor en el aislante inferior.$ $U_{Inferior} = Coeficiente total de transferencia de calor en el aislante lateral.$ $U_{Superior} = Coeficiente total de transferencia de calor en la cubierta.$



Figura 2.14. Coeficientes de pérdidas térmicas en el colector solar placa plana de aire.

El coeficiente de pérdidas térmicas en la parte inferior está por la siguiente ecuación:

$$U_{Inferior} = \frac{k_{Aisl}}{e_{Aisl}}$$
 EC. (2.22)

De donde:

 $k_{Aisl} = Coeficiente de conductividad térmica del material aislante (W/m °K).$ $e_{Aisl} = Espesor del aislante (m).$

Las pérdidas de calor en los laterales del colector solar se pueden evaluar aplicando la ecuación 2.22

$$Q_{Laterales} = U_{Laterales} A_{Abs} (T_{pp} - T_{Amb}) = \frac{k_{Aisl} h_{Col} P}{e_{Aisl}} (T_{pp} - T_{Amb})$$

Entonces tenemos que:

$$U_{laterales} = \frac{k_{Aisl} h_{Col} P}{e_{Aisl} A_{Col}}$$
 EC. (2.23)

Donde:

 $h_{Col} = Altura del colector solar plano (m).$

P = Perímetro del colector solar (m).

El coeficiente de pérdidas de calor en la parte superior es mucho más complejo de evaluar por lo que se aplica la ecuación propuesta por Hottel y Wertz utilizada para placas con temperaturas entre 25° a 225° C con margen de error de $\pm 0,3 W/m^2$. Se tiene entonces la siguiente ecuación:

$$U_{Superior} = \left[\frac{M}{\left(\frac{B}{T_p}\right)\left(\frac{T_p - T_{Amb}}{M + f}\right)^e} + \frac{1}{h_{Vt}}\right]^{-1} +$$
EC. (2.24)
$$\frac{\sigma(T_p + T_{Amb})(T_p^2 + T_{Amb}^2)}{\left[\varepsilon_p + 0.00591Mh_{vt}\right]^{-1} + \frac{2M + f - 1}{\varepsilon_{Cv}} - M}$$

Donde:

M = Número de cubiertas.

 T_P = Temperatura de la placa(°K).

 $\varepsilon_p = Emitancia de la placa.$

 $\varepsilon_{cv} = Emitancia de la cubierta de vidrio.$

 $v_{Vt} = Velocidad del viento (m/s).$

 θ = Inclinación del colector.

$$\sigma = 5.76x10^{-8} (W/m^2 K^4), coeficiente de radiación de Stefan - Boltzmann$$
$$h_{Vt} = 5.7 + 3.8v_{Vt} (W/m^2 {}^{\circ}K), oeficiente de transferencia de calor del viento$$

$$f = (1 + 0.089h_{Vt} - 0.1166h_{Vt} \varepsilon_p)(1 + 0.07866M), constante.$$

$$B = [520(1 - 0.000051\theta^2)], constante.$$

$$e = 0.430(1 - 100/T_p)$$
, constante.

2.17. Transferencia de calor en el colector solar de aire.

En condiciones estables, el rendimiento del colector solar se describe como un balance que indica la cantidad de energía solar incidente se transforma en energía útil, sin embargo, ya trabajando un colector en tiempo real se hará un análisis añadiéndole las perdidas lo que permitirá estudiar e investigar como disminuir estas irreversibilidades. La energía recibida en el absorbedor será la diferencia entre la radiación incidente y las pérdidas ópticas.

Si la transmisividad del vidrio es $\tau = 0,94$ (cuando los rayos solares inciden perpendicularmente sobre el vidrio), indica que deja pasar el 94% de la radiación que le llega, reflejando el otro 6%. Así pues, la radiación que le llega al absorbedor es la potencia captada por unidad de superficie.

Si el absorbedor (acero galvanizado-negro mate sintético) tiene un coeficiente de absortancia de $\alpha = 0.97$, indica que absorbe el 97% de la radiación que le llega, reflejando el otro 3% (si los rayos inciden perpendiculares). Por lo cual, el producto $(\tau \alpha)$, se llama factor óptico o rendimiento óptico del colector. Este valor depende del ángulo de incidencia de los rayos solares y del tipo de colector solar que se va a utilizar (tabla 2.2).

En la figura 2.15 se aprecia Transmisividad de la cubierta transparente (vidrio) y efecto de absorbancia del absorbedor (acero galvanizado pintado negro mate sintético).



Figura. 2.15. Transmisividad de la cubierta transparente y absortancia de la placa.

La energía recibida en el absorbedor será la diferencia entre la radiación incidente y las pérdidas ópticas. De esta manera el calor útil que logra llegar a la placa absorbedora se verá perjudicado por el rendimiento óptico del colector solar de aire (τ_{α}). Se tiene entonces que:

$$H = (\tau \alpha)G_T = \eta_{Opt} G_T$$
 EC. (2.25)

Donde:

H = Flujo de radiación de la placa absorbedora (W/m²).

 τ = Transmitancia de la cubierta.

 α = Absortancia de la placa absorbedora.

 G_T = Radiación solar (W/m^2).

 $\eta_{Opt} = Rendimiento \, \delta ptico \, del \, colector \, solar.$

La ganancia de energía útil por parte del fluido de trabajo se expresa con la ecuación siguiente:

$$Q_{util} = \dot{m}C_p(T_{f.sal} - T_{f.ent})$$
 EC. (2.26)

Donde:

 $\dot{m} = Flujo másico (Kg/s).$

 C_p = Calor específico del fluido (J/Kg °K)

 $T_{f.sal} = Temperatura del fluido a la salida del colector solar (°K).$

 $T_{f.ent} = Temperatura del fluido a la entrada del colector solar (°K).$

La ecuación 2.26 representa la trasferencia de calor útil que se genera desde la placa absorbedora del colector solar hacia el fluido de trabajo (aire), los efectos de algunas variables como los coeficientes de pérdidas de calor y la eficiencia óptica del colector solar no pueden ser observados por lo que se puede emplear la ecuación de Hottel-Whillier que relaciona la ganancia de energía útil transferida al fluido, Q_{util} (W) con las variables del colector solar y datos climáticos. (ASADES, DOCPLAYER, 2011)

$$Q_{util} = A_{Abs} F_{Rc} \left[H - U_{Total} \left(T_{f.ent} - T_{amb} \right) \right]$$
 EC. (2.27)

Donde:

H = Flujo de radiación de la placa absorbedora (W/m²). $U_{Total} = Coeficiente total de pérdidas en el colector solar (W/m² °K).$ $F_{Rc} = Factor de remoción de calor.$

En el factor de remoción de calor F_{Rc} define una cantidad que relaciona la ganancia de energía útil del colector en función de la temperatura de entrada del fluido al miso. Se determina por la siguiente ecuación: (Montoya L, 2011)

$$F_{Rc} = \frac{\dot{m} C_p}{A_{Abs} U_{Total}} \left[1 - exp\left(\frac{F' U_{Total} A_{Abs}}{\dot{m} C_p}\right) \right]$$
 EC. (2.28)

Donde:

 $\dot{m} = Flujo \ másico \ (Kg/s).$ $C_p = Calor \ espécifico \ del \ fluido \ (J/Kg \ ^K).$ $F' = Factor \ de \ eficiencia \ del \ colector.$

2.18. Rendimiento energético del colector solar.

Se puede obtener la eficiencia energética del colector solar a partir de la siguiente ecuación: (Pita. L, 2016)

$$\eta_{En} = \frac{Q_{\text{Útil}}}{A_{Abs} G_T} \qquad \text{EC. (2.29)}$$

El componente de temperatura del fluido a la salida del colector solar puede ser excluido de la ecuación 2.26. Entonces Podemos reformular la eficiencia energética de la siguiente manera:

$$\eta_{En} = \frac{\dot{m} C_p \left[\left(T_{f.ent} - T_{amb} - \frac{H}{U_{Total}} \right) \left(exp \left(-\frac{U_{Total} A_{Abs} F'}{\dot{m} C_p} \right) - 1 \right) \right]}{A_{Abs} G_T}$$
EC. (2.30)

CAPÍTULO III

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO DE AIRE. 3.1. Entropía.

La segunda ley de la termodinámica define la propiedad llamada entropía, que hasta cierto punto se identifica como abstracta y difícil de describir físicamente sin considerar el estado microscópico del sistema.

Uno de los fundadores de la termodinámica Clausius en el año de 1865 comprendió que había descubierto una nueva propiedad termodinámica que llamo con el nombre de entropía designada por la letra S en $J/^{\circ}K$ y se la define de esta manera: (Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, 2012)

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int \, rev}$$
 EC. (3.1)

El cambio de entropía de un sistema que se da durante un proceso puede establecerse integrando la ecuación anterior entre los estados inicial y final:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int \ rev}$$
EC. (3.2)

La entropía es una valiosa herramienta en el análisis de la segunda ley en dispositivos de ingeniería y puede verse como una medida de desorden molecular. Cuando un sistema se vuelve más desordenado, las posiciones de las moléculas son menos predecibles y la entropía aumenta, de ahí que no sorprenda que la entropía de una sustancia sea más baja en la fase sólida donde las moléculas de una sustancia oscilan continuamente en sus posiciones de equilibrio, pero les es imposible moverse unas respecto de las otras, por lo que su posición puede predecirse en cualquier momento con certeza y más alta en la gaseosa en donde las moléculas se mueven al azar, chocan entre
sí y cambian de dirección, lo cual hace sumamente difícil predecir con precisión el estado microscópico de un sistema en cualquier instante.

Durante un proceso real teniendo en cuenta la primera ley de la termodinámica la cantidad de energía siempre se conserva, aunque la calidad de esta se destina a disminuir con relación a la segunda ley de la termodinámica. Esta disminución en la calidad siempre está acompañada por un incremento en la entropía.

En esencia, el calor es una forma de energía desorganizada, y algo de esta entropía fluirá con calor. Como resultado, la entropía y el nivel de desorden molecular del cuerpo caliente disminuyen, mientras que el nivel de desorden molecular del cuerpo frío aumenta. La segunda ley requiere que el incremento en la entropía del cuerpo frío sea mayor que la disminución en la entropía del cuerpo caliente, por lo tanto, la entropía neta del sistema combinado aumenta. Es decir, el sistema combinado se halla en un estado de mayor desorden en el estado final. Se puede concluir entonces que el proceso sólo puede ocurrir en la dirección del aumento de entropía global o desorden molecular, por lo tanto, el universo entero está volviéndose más caótico todos los días.

3.1.1. Balance de entropía para el colector solar de aire.

Las relaciones de balance de entropía para los volúmenes de control (colector solar de placa plana) difieren de las de los sistemas cerrados en los que se involucra un mecanismo más de intercambio de entropía: flujo másico a través de las fronteras en donde la masa posee tanto entropía como energía y las cantidades de estas dos propiedades extensivas son proporcionales a la cantidad de masa.

El balance de entropía puede expresarse para los volúmenes de control:

$$\sum \frac{Q_K}{T_K} + \sum m_i s_i - \sum m_e s_e + S_{gen} = (S_2 - S_1)_{cv}$$
 EC. (3.3)

En forma de tasa tenemos como:

$$\sum \frac{\dot{Q_K}}{T_K} + \sum \dot{m_i} s_i - \sum \dot{m_e} s_e + S_{gen}^{\dagger} = \frac{ds_{cv}}{dt}$$
 EC. (3.4)

Siendo:

 $\dot{S}_{gene} = Entropia generada para el colector solar (J/°K).$

- $s_e = Entropia de entrada (J/°K).$
- s_i = Entropia de salida ($J/^{\circ}K$).
- \dot{Q}_k = Transferencia de calor a través de la frontera (W).
- T_K = Temperatura en la frontera (°K).

La mayoría de los volúmenes de control que se encuentran en la práctica (colectores solares, turbinas, compresores, toberas, difusores, tuberías y ductos) operan en forma estacionaria, por lo tanto, no experimentan ningún cambio en su entropía. En consecuencia, la relación del balance de entropía para un proceso general de flujo estacionario puede obtenerse de la ecuación anterior al hacer $\frac{ds_{cv}}{dt} = 0$ puede observarse la ecuación 3.4 y reformulando términos para obtener:

$$\dot{S}_{gene} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{Q_k}{T_K}$$
 EC. (3.5)

Para el colector solar de flujo estacionario con un solo flujo de entrada y salida, la relación del balance de entropía se simplifica a:

$$\dot{S}_{gene} = \dot{m}(s_e - s_i) - \sum \frac{Q_k}{T_K}$$
 EC. (3.6)

3.2. Exergía.

El progresivo conocimiento de que los recursos energéticos en el mundo son limitados, esto ha incitado que varios países reexaminen sus políticas sobre energía y tomen medidas rápidas para obviar el desperdicio. También ha degenerado el provecho en la colectividad de la ciencia para considerar más de cerca a los dispositivos de transformación de energía y desenvolver nuevos métodos que admitan utilizar mejor los finitos recursos existentes.

La segunda ley de la termodinámica ha manifestado ser un arma muy eficaz en la optimización de sistemas termodinámicos complicados.

Cuando una fuente nueva de energía es descubierta, tal es el caso de un pozo geotérmico lo primero que los exploradores hacen es evaluar qué cantidad de energía se encuentra contenida en la fuente. Aunque esta información no es suficiente para decidir si es factible construir una central eléctrica.

En realidad, lo que se necesita saber es la cantidad de energía que podemos extraer como trabajo útil. El resto de la energía se descarta como energía de desecho. Es deseable tener una propiedad que permita determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado especificado. Esta propiedad es la exergía, que también se denomina disponibilidad, que sirve como una valiosa herramienta en la determinación de la calidad de la energía y en la comparación de los potenciales de trabajo de diferentes fuentes de energía o sistemas.

La aplicación de los métodos de la exergía en general es una técnica con sinónimo de capacidad en la energía para originar un cambio en el sistema, depende también de la forma de energía, de los parámetros y por consiguiente los de exterior. (Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, 2012)

3.2.1. Transferencia de exergía por calor y masa.

El calor es una forma desorganizada de energía y solo una parte de éste se convierte en trabajo el cual es una forma organizada de energía. Constantemente es posible que se pueda producir trabajo mediante calor a una temperatura mucho mayor a la que se encuentra en el ambiente, el cual es transferido a una máquina térmica que expulsa hacia el medio el calor de desperdicio. La transferencia de calor se encuentra siempre acompañada por la transferencia de exergía.

La transferencia de calor Q en una ubicación que se encuentra a temperatura termodinámica T siempre está acompañada por la transferencia de exergía EX_{calor} .

$$Ex_{calor} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T}\right)\dot{Q}$$
 EC. (3.7)

Siendo:

 $Ex_{calor} = Transferencia de exergía por calor (J).$

T = Temperatura donde ocurre la transferencia de calor (°K).

Esta relación da la transferencia de exergía que acompaña la transferencia de calor de Q siempre que T sea mayor o menor que T_{Amb} . Cuando T > T_{Amb} , la transferencia de calor hacia un sistema aumenta la exergía de éste y la transferencia de calor desde un sistema lo disminuye. Pero lo opuesto se cumple cuando T < T_{Amb} . En este caso, la transferencia de calor Q es el calor desechado hacia el medio frío (el calor de desperdicio) y no debe confundirse con el suministrado por el ambiente a T_{Amb} . La exergía transferida debido al calor es cero cuando T = T_{Amb} en el punto de transferencia.

La transferencia de calor debida a una diferencia limitada de temperatura es irreversible, y como resultado se genera alguna entropía. La generación de entropía siempre está acompañada por la destrucción de exergía como podemos observar en la figura 3.1. También debemos de notar que la transferencia de calor Q en una ubicación a temperatura T siempre está acompañada por la transferencia de entropía en la cantidad de Q/T y la transferencia de exergía en la cantidad de $(1 - T_{Amb}/T) Q$.

La masa contiene exergía, así como energía y entropía, y los contenidos de éstas en un sistema son proporcionales a la masa. También, las tasas de transportación de exergía, entropía y energía hacia dentro o hacia fuera de un sistema son proporcionales al flujo másico.

Cuando una cantidad de masa entra o sale de un sistema, la acompaña una cantidad de exergía donde:

$$\dot{m}Ex = (h - h_0) - T_{Amb}(s_e - s_i) + \frac{V^2}{2} + gz$$
 EC. (3.8)

Donde:

 $\dot{m}Ex = Transferencia de exergía por masa.$

$$V = Velocidad (m/s).$$

$$g = Aceleración de la gravedad (m/s2).$$

$$z = Altura(m).$$

Por lo tanto, la exergía de un sistema aumenta en $m\psi$ cuando entra la cantidad de masa m, mientras que disminuye en la misma cantidad cuando la misma cantidad de masa en el mismo estado sale del sistema.



Figura 3.1 Transferencia y destrucción de exergía durante un proceso de transferencia de calor.

3.2.2. Balance de exergía en un colector solar plano de aire.

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

Con relación al balance de exergía en un colector solar primero debemos saber que los sistemas de flujo estacionario la cantidad de exergía que entra en las diversas formas (calor, masa) debe de ser igual a la cantidad de la exergía que sale más la exergía destruida. Denotamos entonces que la forma de tasa del balance general de exergía para un proceso de flujo estacionario es:

$$\sum \left(1 - \frac{T_{Amb}}{T_K}\right) \dot{Q}_K - \dot{W} + \sum_{ent} \dot{m} Ex - \sum_{sal} \dot{m} Ex - Ex_{dest} = 0 \qquad \text{EC. (3.9)}$$

Donde:

 $Ex_{dest} = Exergía \ destruida (J).$ $\dot{W} = Tranajo (J).$

Para un dispositivo de flujo estacionario y una sola corriente es decir con una entrada y una salida, como el colector solar tenemos:

$$\sum \left(1 - \frac{T_{Amb}}{T_K}\right) \dot{Q}_K - \dot{W} + \dot{m}(Ex_{Ent} - Ex_{Sal}) - Ex_{dest} = 0 \quad \text{EC. (3.10)}$$

Donde:

 $Ex_{Ent} = Exergía de corriente de entrada (J/Kg).$

 $Ex_{Sal} = Exergía de corriente de salida (J/Kg).$

En figura 3.2 se muestran los flujos de exergía de un colector solar:



Figura 3.2. Flujos de exergía en un colector solar. **Fuente:** ASADES

Para un colector solar de sistema abierto que se encuentre en estado estacionario en su operación el balance de exergía se lo puede expresar de la siguiente manera:

$$\sum \dot{E} x_{entrada} - \sum \dot{E} x_{salida} = \sum \dot{E} x_{destruida.}$$
 EC. (3.11)

Donde:

 $\dot{E}x_{entrada}$ = Tasa de Exergía de entrada.

 $\dot{E}x_{salida}$ = Tasa de Exergía de salida.

 $\dot{E}x_{destruida.} = Tasa de Exergía destruida.$

Como es de suponerse hay que tomar en cuenta que la tasa de exergía de entrada al colector solar de aire contiene la exergía del calor absorbido y la exergía del fluido de entrada. La exergía de salida del colector es igual que la exergía del fluido a la salida. La distinción entre ambos componentes constituye la cantidad de exergía destruida en el colector.

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

$$\dot{E}x_{fluido} = \dot{m} C_p \left[\left(T_{fluido} - T_{Amb} \right) - T_{Amb} l_n \left(\frac{T_{fluido}}{T_{Amb}} \right) \right] \quad \text{EC. (3.12)}$$

Donde:

$T_{fluido} = Temperatura \ del \ fluido \ (^{\circ}K).$

La diferencia entre las exergías del fluido a la salida y entrada del colector representa el incremento del flujo de exergía $\Delta E x_f$ como se observa en la siguiente ecuación:

$$\dot{E}x_{f.sal} - \dot{E}x_{f.ent} = \dot{m} C_p \left[\left(T_{f.sal} - T_{f.ent} \right) - T_{Amb} l_n \left(\frac{T_{f.sal}}{T_{f.ent}} \right) \right] \text{EC. (3.13)}$$

Denotamos que $\dot{E}x_{f.entr}$ corresponde a la exergía del fluido a la entrada del colector solar y $\dot{E}x_{f.sal}$ es la exergía del fluido a la salida del colector. (Pita. L, 2016)

La mayor cantidad de la exergía de entra al dispositivo por la radiación solar es absorbida por las placas de absorción. El contenido de exergía de una transferencia de calor aplicada ya al colector se obtiene a partir de la ecuación 3.7:

$$\dot{E}x_{calor} = Q\left(1 - \frac{T_{Amb}}{T}\right)$$
 EC. (3.14)

Tomando en consideración el modelo de Petela, se puede calcular la cantidad de energía de la radiación del sol. Se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{E}x_{rad.sol} = A_{Abs}G_T \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{Amb}}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{Amb}}{T_{sol}} \right)^4 \right]$$
 EC. (3.15)

Donde:

 $\dot{E}x_{rad.sol} = Exergía de la radiación solar (J/s).$ $T_{sol} = Temperatura del sol (°K).$

La cantidad de exergía que es absorbida por la placa colectora plana se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\dot{E}x_{Abs} = \eta_{op} A_{Abs} G_T \left(1 - \frac{T_{Amb}}{T_{Abs}} \right)$$
 EC. (3.16)

Donde:

$\dot{E}x_{Abs} = Exergía absorbida por la placa del colector solar plano (J/s).$ $\eta_{op} = Es el rendimiento óptico.$

Para poder valorar la destrucción de la exergía hay que tener en cuenta que el proceso de transferencia de calor del sol para el fluido de trabajo del colector solar se constituye de dos partes principales, la absorción de la radiación del sol por la placa absorbedora y la transferencia de calor que se proporcione de la placa de absorción al fluido de trabajo. Las destrucciones de exergía se producen durante estos dos procesos.

La destrucción de la exergía en el proceso de absorción se debe a la diferencia de temperatura entre la placa de colector absorbente y la temperatura aparente de la radiación del sol. Esta parte de la destrucción de la exergía se obtiene de restar las ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$\dot{E}x_{dest.sol-Abs} = A_{Abs}G_T \left(1 + \eta_{op} + \eta_{op} \frac{T_{Amb}}{T_{Abs}} - \frac{T_{Amb}}{T_{ap.sol}} \right) \qquad \text{EC. (3.17)}$$

La segunda parte de la destrucción de la exergía se debe a que se escapa calor desde la placa absorbedora del colector hacia los alrededores del medio ambiente, se puede representar por la siguiente expresión: (Pita. L, 2016)

$$Q_{m.Amb} = U_{Total} A_{Abs} (T_{Abs} - T_{Amb})$$
 EC. (3.18)

Donde interviene U_{Total} que es el coeficiente total de pérdidas en producto con el área de la placa del colector y la diferencia de temperatura de la placa absorbedora y el medio ambiente.

La destrucción de la exergía debido a las pérdidas de calor del colector solar se puede lograr:

$$\dot{E}x_{dest.alrr} = U_{Total}A_{Abs}(T_{Abs} - T_{Amb})\left(1 - \frac{T_{Amb}}{T_{Abs}}\right)$$
 EC. (3.19)

La última parte de las pérdidas de exergía se debe al proceso de transferencia de calor de la placa de absorción al fluido de trabajo. La exergía transferida de la placa absorbedora para el fluido de trabajo se obtiene a partir de:

$$\dot{E}x_{Abs-fluido} = \dot{m}_{fluido}C_p\left[\left(T_{f.sal} - T_{f.ent}\right)\left(1 - \frac{T_{Amb}}{T_{Abs}}\right)\right] \qquad \text{EC.} (3.20)$$

La diferencia entre la ecuación 3.13 y la ecuación 3.20 nos permite obtener la tasa de exergía destruida que se da en el proceso de transferencia de calor desde la placa absorbedora del colector solar al fluido de trabajo. (Pita. L, 2016)

$$\dot{E}x_{dest.Abs-fluido} = \dot{m}_{fluido}C_pT_{Amb}\left[\left(ln\frac{T_{f.sal}}{T_{ent}}\right) - \frac{T_{fsal}-T_{fent}}{T_{Abs}}\right] \text{EC.} (3.21)$$

3.2.3. Rendimiento exergético de un colector solar de aire.

El rendimiento exergético es un parámetro útil para medir las mejoras introducidas en un sistema tanto en cuanto a la disminución de la exergía perdida como en cuanto al aprovechamiento de flujos de exergía recuperable dentro del propio sistema.

Un factor importante de este concepto es que es aplicable a cualquier tipo de proceso, no sólo a máquinas térmicas motoras o de refrigeración, sino también a cualquier proceso industrial en el que los intercambios energéticos tengan una cierta importancia: procesos de la industria química, centrales térmicas o incluso balances de consumo de energía de un país. (Abreu A)

En base a los fundamentos de la segunda ley de la termodinámica la eficiencia exergética está dada por:

$$\eta_{Ex} = \frac{Exergía \ recuperada}{Exergía \ suministrada}$$
 EC. (3.22)

Es posible obtener la eficiencia de segunda ley para diferentes procesos térmicos que funcionan como sistemas abiertos en estado estacionario. La eficiencia exergética del colector solar se obtiene dividiendo el incremento del flujo de exergía al fluido de trabajo para el total de la exergía de entrada que proviene de la radiación solar (Farzad, 2013).

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{m}C_p \left[\left(T_{f.sal} - T_{f.ent} \right) - T_{amb} l_n \left(\frac{T_{f.sal}}{T_{f.ent}} \right) \right]}{A_{Abs} G_T \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)^4 \right]}$$
EC. (3.23)

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4. Simulación CFD del colector solar placa plana de aire.

Los colectores solares encuentran múltiples aplicaciones en sistemas de calentamiento, de secado, de refrigeración, etc. En los sistemas de secado con energía solar, el colector solar plano para el calentamiento del aire es quizás la parte esencial del sistema. Por tanto, es muy importante para el buen comportamiento del sistema de secado que el colector solar posea un elevado desempeño energético.

El abordaje del análisis energético de los colectores solares generalmente se realiza en condición estacionaria, sin embargo, para los colectores operando en convección natural es muy importante considerar condiciones no estacionarias de comportamiento, pues las condiciones de salida se afectan seriamente ante cada variación de la radiación incidente o de las condiciones ambientales. Esta es la razón por la que cada vez más se emplean métodos de CFD (Computational Fluid Dynamics) para el análisis y diseño de colectores solares. A diferencia de los colectores con tiro forzado donde ante tales variaciones solo cambian la temperatura de entrega del aire del colector, en los colectores de tiro natural se afecta también el flujo de aire. (Bayón, 2015)

4.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Dinámica de fluidos computacionales o CFD es el análisis de los sistemas que implican flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados, tales como reacciones químicas por medio de la simulación por ordenador.

La CFD se define como la técnica informática que busca la simulación del movimiento de los fluidos. Es una rama de la mecánica de fluidos que emplea métodos

numéricos y algoritmos para analizar y resolver los problemas que implican a los flujos de los fluidos. Comprende una gran variedad de ciencias, como las matemáticas, la informática, la ingeniería o la física, las cuales van a trabajar conjuntamente para proporcionar los medios para modelar fluidos. (H.K. Versteeg, 2007)

Existe una gran secuencia para la validación de un proceso de simulación por ordenador CFD, por la cual en esta investigación se analizará el comportamiento del fluido en el colector solar mediante la modelación y para ello emplearemos los programas GAMBIT y FLUENT y de esta manera obtener las mejores alternativas de construcción.

El hecho de utilizar este software permite trabajar sobre casos complejos, como es el flujo turbulento y el desprendimiento de vórtice de un álabe, así como simular casos en el que una prueba experimental puede ser muy costosa o resulta peligroso, y llevarlo a cabo en un tiempo relativamente reducido. (Villanueva, 2015)

Mediante la discretización del área de estudio se crea una malla formada por pequeños volúmenes de control, donde se solucionan las ecuaciones diferenciales de mecánica de fluidos convenientes, junto con las condiciones de contorno e iniciales se resuelve la matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.

Los resultados de la resolución numérica son relevantes en el desarrollo de nuevos productos, solución de problemas y rediseño.

El análisis computacional es un complemento a los estudios experimentales, reduciendo el esfuerzo requerido en la evaluación de diseños y la adquisición de los datos.

4.2. Generadores de vórtice.

Los métodos de vorticidad son una técnica numérica que permiten simular con una buena resolución problemas de flujos de fluidos viscosos e incompresibles. Una ventaja y diferencia importante de estos, en comparación con otros métodos numéricos de solución y visualización de flujos (como por ejemplo los métodos de CFD basados en los elementos finitos) es la independencia absoluta de enmalladores. Sin embargo, debido a su simplicidad y a su independencia de enmallado no son triviales de implementar.

Los generadores de vórtices son unas aletas o terminaciones que provocan que el aire que está pasando por esa zona salga a partir de ahí en forma de espiral (en plan tornado).

La función de un vórtice es afectar a la dinámica del aire, consiguiendo diversos efectos como redirigir el aire hacia ciertas zonas, conseguir eliminar o controlar turbulencias, alimentar con más aire una zona concreta del monoplaza, evitar a la rotura de la capa límite del aire, sellar aerodinámicamente zonas del colector. (payoloco, 2014).

Cuando la frecuencia de generación de vórtices se acerca a la frecuencia natural del objeto, entonces una vibración lateral apreciable se genera en el mismo.

El régimen turbulento se caracteriza por su baja difusión de momento, alta convección y cambios espacio-temporales rápidos de presión y velocidad, lo que hace del cálculo del comportamiento del fluido en este estado algo complejo. La aparición de vórtices que interactúan entre sí y la fuerza de arrastre y empuje debida a la fricción en la capa límite hace que la manera más sencilla de plantear el problema sea mediante un volumen de control que ofrece un resultado global del sistema.

Gracias al avance tecnológico se ha podido hacer uso del análisis diferencial, que ha permitido modelizar los puntos del perfil donde se resuelven las ecuaciones de mecánica de fluidos en cada espacio de tiempo, obteniéndose un resultado mucha más próximo a la realidad.

4.3. Modelación de la geometría del colector solar.

Especificación de la geometría de dominio y diseño de la red son las principales tareas en la etapa de entrada, en esta investigación se emplea la programación de GAMBIT para generar la geometría del dominio y generación de mallas dentro de la simulación CFD.

GAMBIT.

GAMBIT es un software de generación de la geometría y la malla de análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD). GAMBIT tiene una interfaz única para la creación de geometría y mallado que reúne varias tecnologías de pre-procesamiento en un entorno. Herramientas avanzadas para el diario le permiten editar y convenientemente replay sesiones modelo de construcción para estudios paramétricos. (UNIVERSITY, 2015)

En el presente trabajo, se desarrolla un procedimiento simplificado para la simulación numérica del flujo de calor a través de un colector de placa plana de tiro forzado, utilizando el software GAMBIT, desde donde se crea la geometría y el mallado para posteriormente exportarlo al código CFD-Fluent, basado en un procedimiento de volúmenes finitos.

Para el desarrollo de la geometría del colector ejecutamos el programa GAMBIT desde nuestro ordenador. El entorno de trabajo que nos ofrece el programa esta direccionado a la creación y generación de malla de la geometría del colector.

4.3.1. Pasos para creación de la geometría del colector en GAMBIT.

Una vez ejecutado el programa GAMBIT nos ofrece un panel de control que se muestra en la figura 4.1 el cual debemos elegir en la barra superior de operaciones la geometría del volumen del colector.



Figura 4.1: Entorno de trabajo de GAMBIT **Fuente:** Software GAMBIT

El primer paso es crear la placa del colector con sus respectivas dimensiones; ancho X, altura Y, y profundidad Z, hay que tener en cuenta al aplicar las dimensiones, el colector debe tener su dirección como lo muestra la figura 4.2, y de la misma manera cada elemento debe estar referenciado con su respectivo nombre.

Create	e Real Brick
Width(X) 80	
Depth(Y) 0.158	
Height(Z) 160	DW
Coordinate Sys.	c_sys.1
Direction	+X +Y +Z 🔳
Label PLACA	
Apply	Reset Close

Figura 4.2: Crear elemento real del colector **Fuente**: Software GAMBIT

Una vez generada la placa absorbedora se procede a crear el tipo de aleta requerida para mejorar el rendimiento del colector solar.

4.3.2. Tipos de aletas.

En este estudio para el análisis de diseño del colector solar se procedió en la elaboración de 10 tipos de aletas, las cuales de acuerdo a esta investigación se analizarán las temperaturas de salidas, rendimiento exergético, horas de trabajo y el ángulo de inclinación del colector solar, variables que se tomaran en cuenta para determinar cuál es el tipo de aleta más eficiente.

A continuación, se detallan los 10 tipos de aletas con sus respectivas medidas y los elementos del colector solar.





Figura 4.3: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices en tres bolillos, cuadrado a 45° **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.4: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices en tres bolillos, cónicos **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.5: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices en tres bolillos, pupelar **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.6: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices en tres bolillos, cilíndricos **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.7: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices rectangular a 45° **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.8: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices en rombo **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.9: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices en tres bolillos, cilíndrico a 90° **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.10: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices laminas diagonales a 45° **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.11: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices en tres bolillos triángulos 45° **Fuente:** Software GAMBIT



Figura 4.12.: Vista isométrica del colector solar y su generador de vórtices con agujeros en tres bolillos. **Fuente:** Software GAMBIT

4.3.3. Creación de la geometría de la placa absorbedora aleteada.

Para la construcción del tipo de aleta figura 4.12 en GAMBIT, se debe crear un elemento con dimensiones, ancho 80 cm, altura 1.5 cm, y profundidad 0.158 cm, agujeros de 1 cm de diámetro, separaciones entre agujeros 7.9 cm como se muestra en la figura 4.13, este tipo de generador de vórtices de acuerdo al análisis está conformado entre aletas sus agujeros en tres bolillos, la separación entre aletas es de 14 cm empezando con una distancia de 10 cm en ambos extremos.



Figura 4.13: Placa absorbedora con sus aletas con agujeros en tres bolillos **Fuente**: Software GAMBIT

Para concluir con la geometría del colector se crean los elementos de aire, aislante, y vidrio con las dimensiones que se muestra en la tabla 4.1.

Flomontos	Dim	Dimensiones (cm)		
Liementos	X	Y	Z	
Aire	80	7,5	160	
Aislante	80	7,5	160	
Vidrio	80	0,6	160	

 Tabla 4.1: Dimensiones del Colector Solar Real

Una vez creado los elementos del colector solar procedemos a ubicarlos en su lugar correspondiente.



Figura 4.14: Cuerpo del Colector Solar. **Fuente:** Software GAMBIT.

Para culminar la geometría del colector solar con sus respectivas aletas y previo al mallado se debe sustraer los volúmenes que ocupan las aletas dentro del volumen del aire con los comandos correspondientes y posteriormente conectar las superficies de todos los elementos (aislante, placa, aletas, aire y vidrio) que se formaron en la unión de piezas del colector solar.

4.3.4. Sustracción de los volúmenes aire - aletas.

Para la sustracción del volumen del aire, se debe escoger en la barra de operación de la geometría en la opción de unión se da clic y se selecciona sustracción como se ilustra en la figura 4.15 (a), para ello en el recuadro que aparece en el programa durante la selección se elige el volumen del aire y después el volumen que se va a sustraer que en este caso son las aletas como se asigna en la figura 4.15 (b) y luego se aplica.



Figura 4.15: Sustracción de volúmenes de Aire y Aletas del colector solar **Fuente:** Software GAMBIT

4.3.5. Conexión de las superficies del colector solar.

Para la unión de todas las superficies del colector solar, se elige en la barra de operaciones-geometría en la opción caras se selecciona conectar caras, figura 4.16 (a), y para ello en el recuadro que se ilustra después de la selección se eligen todas las caras que se encuentran en el colector solar figura 4.16 (b), y luego se aplica, cabe recalcar que el número de caras depende del tipo de aleta que se seleccione.



Figura 4.16: Unión de superficies del colector solar **Fuente:** Software GAMBIT

Cuando las caras se conectan, las caras de los elementos que están en contactos entre ellas una de esa cara se suprime, es decir aislante superior se suprime por la placa inferior.

4.4. Generación de malla.

El siguiente paso es mallar la geometría. Se distinguen dos tipos de mallas: estructuradas y no estructuradas.

En las mallas estructuradas los conjuntos de líneas de malla de un mismo grupo no se cortan entre sí y cortan solamente una vez a cada línea de los otros grupos. Como desventaja mencionar la dificultad que presentan para controlar la distribución de celdas en la malla, por este motivo cuando la geometría es demasiado compleja se recomienda usar un mallado no estructurado.

En una malla no estructurada no hay restricciones en la forma de las celdas ni en el orden de los nodos, por esta razón los métodos de resolución son más lentos que en las estructuradas.

Para ejecutar el mallado y conseguir que cumpla con ciertas propiedades de simetría o de número de elementos se debe emplear el método de mallado por borde.

El tamaño inicial de los elementos y el factor de crecimiento son determinantes de la buena calidad de la malla, por lo que pudieran tener que ser cambiados posteriormente para generar una mala más adecuada, dependiendo de los resultados del chequeo de la calidad de la misma.

Para empezar con el mallado de nuestro colector solar en la barra de operaciones se escoge el mallado por borde esto indica que se a elegir el número de secciones de la malla que generaremos en cada elemento del colector solar.



Figura 4.17: Entorno de trabajo del mallado **Fuente:** Software GAMBIT

Cabe destacar que el número de secciones de la malla depende de la capacidad de cada ordenador y de la precisión de resultados por cada iteración en la ejecución del FLUENT.

4.4.1. Mallado de la altura de la placa a la entrada y salida.

En este estudio para el mallado por borde se debe escoger un borde para cada elemento del colector solar.

Primero se empieza por la placa la cual tiene una altura de 0.158 cm y para ello de acuerdo al estudio se divide en 5 secciones por lo que resultado del espacio de cada sección es de 0.0316 cm, se coloca este valor en el programa y se aplica, en donde el resultado es 5 espacios como se muestra en la figura 4.18 (a), de la placa absorbedora en la entrada del fluido del colector, este proceso se debe repetir en la parte posterior de la placa o salida del fluido como se muestra en la figura 4.18 (b).



Figura 4.18: mallado por borde de la placa absorbedora entrada y salida. **Fuente:** Software GAMBIT.

4.4.2. Mallado de la altura del aislante a la entrada y salida.

Para el aislante la altura es 7.5 cm y para ello de acuerdo al estudio se divide en 6 secciones por lo que resultado del espacio de cada sección es de 1.25 cm, se coloca este valor en el programa y se aplica, en donde el resultado es 6 espacios como se muestra en la figura 4.19 (a), del aislante en la entrada del fluido del colector, este proceso se debe repetir en la parte posterior del aislante o salida del fluido como se muestra en la figura 4.19 (b).



Figura 4.19: Mallado por borde del aislante a la entrada y salida. **Fuente:** Software GAMBIT.

4.4.3. Mallado de la altura del vidrio a la entrada y salida.

La altura del vidrio es de 0.6 cm y para ello de acuerdo al estudio se divide en 6 secciones por lo que resultado del espacio de cada sección es de 0.1 cm, se coloca este valor en el programa y se aplica, en donde el resultado es 6 espacios como se muestra en la figura 4.20 (a), del vidrio en la entrada del fluido del colector, este proceso se debe

repetir en la parte posterior del vidrio o salida del fluido como se muestra en la figura 4.20 (b).



Figura 4.20: Mallado por borde del vidrio a la entrada y salida. **Fuente:** Software GAMBIT.

4.4.4. Mallado de la altura del aire a la entrada y salida.

En esta parte de mallado por borde del aire, hay que tener en cuenta que es la parte operativa de nuestro colector solar y es allí en donde hay que analizar cuál es la parte más útil en la entrada y por ello se hace un mallado especial reduciendo las zonas en la parte superior e inferior de la entrada y salida del fluido.

En el programa aplicamos doble radio de 1.2 cm por cada sección esto quiere decir que la distancia que existe en el elemento del aire se divido en dos con distancias de 1.2 por cada sección como se ilustra en la figura 4.21



Figura 4.21: Radio del mallado del aire **Fuente:** Software GAMBIT.

La altura del elemento de aire es de 7.5 cm, situamos el espacio de 0.5, teniendo en cuenta el doble radio de 1.2 cm, luego se aplica, en donde el resultado es 15 espacios como se muestra en la figura 4.22 (a), del elemento de aire en la entrada del fluido de nuestro colector, este proceso se debe repetir en la parte posterior del elemento de aire o salida del fluido como se muestra en la figura 4.22 (b).

Cabe destacar que este tipo de mallado se hace cuando se quiere analizar las zonas más cercanas a los vértices, es decir, es más ajustado que el centro por ser de mayor interés, por la cual en la figura 4.22 se muestra que la zona del borde de mallado de aire no es simétrico y por ello el valor que se colocó en el espacio es una progresión de acuerdo al doble radio que se aplicó.



Figura 4.22: mallado por borde del aire entrada y salida. **Fuente:** Software GAMBIT.

4.4.5. Mallado del ancho del colector solar.

El ancho de todos los elementos del colector es de 80 cm, por ello de acuerdo al estudio se divide en 80 secciones por lo que resultado del espacio de cada sección es de 1 cm, se seleccionan el ancho en la entrada y salida de todas las partes de los elementos del colector, luego se ubica el valor del espacio de cada sección en el programa y luego se aplica, en donde el resultado es 80 espacios como se muestra en la figura 4.23.



Figura 4.23: mallado por borde del ancho del colector solar entrada y salida. **Fuente:** Software GAMBIT.

4.4.6. Mallado de la profundidad del colector solar.

La profundidad de todos los elementos del colector es de 160 cm, por ello de acuerdo al estudio se divide en 80 secciones por lo que resultado del espacio de cada sección es de 2 cm, se seleccionan las partes laterales, izquierdo y derecho de todas las partes de los elementos del colector, luego se ubica el valor del espacio de cada sección en el programa y luego se aplica, en donde el resultado es 80 espacios como se muestra en la figura 4.24.



4.4.7. Mallado por volumen.

En la barra de operaciones-malla se selecciona el mallado por volumen como se muestra en la figura 4.25.



Figura 4.25: mallado por volumen Fuente: Software GAMBIT

Para este proceso del mallado por volumen se deben elegir todos los elementos que forman el colector como aislante, placa absorbedora, aire, vidrio en lo cual se enlazan los mallados generados por bordes y forman la malla de toda la geometría que se requiere para el análisis en el programa FLUENT.



Figura 4.26: Mallado de los elementos del colector solar. **Fuente:** Software GAMBIT

Culminado el mallado de la geometría del colector solar se obtuvieron el número

MALLADO DEL COLECTOR SOLAR			
Componentes	N° Elementos		
Vidrio	38400		
Aire	276159		
Placa	32000		
Aislante	38400		

de elementos de cada componente los cuales se detallan en la figura 4.2

Tabla 4.2: Número de elementos del mallado del colector

4.5. Especificación de las condiciones de contorno.

Los Tipos de medios continuos como fluidos o sólidos, determinan las características del modelo dentro del área designada. Las especificaciones de tipo límite definen las propiedades físicas de los modelos que representan los límites del modelo de topología y características de funcionamiento de la entidad.



Figura 4.27: Tipos de límites para las condiciones de contorno del colector solar. **Fuente:** Software GAMBIT.

Para ello en la barra de operaciones-especificaciones de tipos de límites, figura 4.28 (a), en el recuadro de la figura 4.28 (b) se escoge la cara de cada elemento, el tipo de función que cumple cada cara y su nombre respectivo.



Figura 4.28: Condiciones de tipos de límites **Fuente:** Software GAMBIT

Para este estudio y los tipos de condiciones se empleará las entidades tridimensionales con especificaciones de entrada y salida del flujo y paredes lateral derecho e izquierdo y superficies tanto superior como inferior en el colector solar. Las superficies límites de cada componente se definen en el programa de acuerdo como corresponda, simetría o pared. En el caso de aire para convección forzada se empleará VELICITY INLET y a la salida PRESSURE OUTFLOW, como se muestra en la tabla 4.3.

Componente	FACE (CARAS) DEL COLECTOR SOLAR					
solar	Entrada Del Fluido	Salida Del Fluido	Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Superior	Inferior
Aislante	WALL	WALL	SIMETRY	SIMETRY		WALL
Placa	WALL	WALL	SIMETRY	SIMETRY		WALL
Aire	VELOCITY INLET	PRESSURE OUTFLOT	SIMETRY	SIMETRY	WALL	WALL
Vidrio	WALL	WALL	SIMETRY	SIMETRY	WALL	

Tabla 4.3 Condiciones de contorno del colector solar

En la tabla 4.3 se muestra 21 superficies que forman el colector solar, indicando los espacios en blanco, son elementos del colector solar que están ubicados unos encima de otro y al unir las caras, una cara del elemento que hace contacto con el otro se elimina, como por ejemplo la placa absorbedora no tiene cara superior esto quiere decir que es lo mismo que se diga aire inferior.

En esta investigación se hace referencia en la entrada (VELOCITY INLET) y salida (PRESSURE OUTFLOT) del aire, ya que es el lugar en donde circula el fluido para el secado de granos, lo que se trata de modelar y analiza es la turbulencia que provocan las aletas al hacer contacto con el aire y demostrar cual es el impacto en el rendimiento total del colector solar virtual.

4.6. Especificación de tipos de condiciones.

Para culminar con el proceso de GAMBIT hay que determinar los tipos condiciones de los elementos del colector solar y para ello en la barra de operaciones se selecciona las especificaciones de tipos de condiciones como se ilustra en la figura 4.29.

Operation			
			181
	Zo	nes	
Specify Continuum Types			
Figura 4.29: tipos de condiciones			

Figura 4.29: tipos de condicione Fuente: Software GAMBIT

En este caso se selecciona cada volumen del colector y se le especifica si es sólido o fluido, se coloca su nombre y luego se aplica y en el recuadro que se encuentra en parte superior se denota lo que hemos guardado, lo que se muestra en la figura 4.30.

Specify Continuum Types		
FLUENT 5/6		
Action:		
🔶 Add 🛛 💠 Mo	🕹 Modify	
🔷 Delete 🗳 Del	ete all	
Name Type		
AIRE	FLUID 🛆	
PLACA	SOLID	
AISLANTE	SOLID	
VIDRIO	SOLID	
☐ Show labels ☐ Show colors		
Nama		
Name:		
Туре:		
SOLID 🗖		
Entity:		
Volumes 🖃 📘	•	

Figura 4.30: Condiciones del colector solar **Fuente:** Software GAMBIT


Figura 4.31: Colector solar con sus respectivas condiciones de contorno. **Fuente:** Software GAMBIT.

Después de las condiciones de contorno del software GAMBIT se exporta la malla en la barra de tareas en **FILE-EXPORT**. Se escoge **MESH** y la malla se exporta como un archivo en el ordenador, extensión **MESH**.

4.7. Modelación en software Fluent.

Fluent es un software de modelación y simulación que utiliza CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para resolver problemas de flujo de fluido empleando el método de volúmenes finitos para solucionar las ecuaciones que rigen el comportamiento de los mismos. Proporciona la capacidad de usar diferentes modelos físicos para definir las características de los fluidos como viscoso o ideal, newtoniano o no, laminar o turbulento, etc.

El alcance del programa es tan amplio que permite modelar sistemas de transferencia de calor y reacciones para aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de una aeronave a la combustión en un horno, plataformas petrolíferas, la fricción del traje de baño de un nadador, el flujo de la sangre, plantas de tratamiento de aguas residuales, mezclas de fluidos entre los principales. (Gutiérrez, 2014)

Este estudio esta direccionado a la modelación de un colector solar de aire de placa plana con tiro forzado, para ello analizaremos el comportamiento del flujo de aire con diferentes tipos de aletas que permiten que el flujo de aire sea turbulento dentro del colector solar.

El primer paso es iniciar el programa FLUENT, el cual muestra una ventana, indicando las opciones de trabajar.

En este estudio para el colector solar se aplica la opción en 3d y el modo de full simulación como lo indica la figura 4.32; cabe indicar que las opciones de 2ddp y 3ddp significan que son para modelación y simulación de soluciones doble precisión, 2d y3d son para modelación y simulación de soluciones simple y el modo POST ONLY (solo publicar) solo permite configurar post procesos y no permite realizar cálculos.

Version	S
2d	
2ddp	
3d	
3ddp	
Selectio	n
3d	
Mode	Full Simulation Full Simulation
Ru	Post Only

Figura 4.32: Modos de Simulaciones **Fuente:** Software FLUENT.

Para disponer de la malla se aplica la opción en la barra de tareas **File-Read-Case** figura 4.33 y buscamos el archivo exportado de GAMBIT extensión MESH.

File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Report	Parallel	Help
	Read)	•	Case		1			
	Write		,	•	Data					
	Import		1	•	Case & Da	ata				
	Export.				PDF					
			T:	auna 1	22. 1000 00	an de le m	110			

Figura 4.33: leer caso de la malla. **Fuente:** Software FLUENT.

Lo siguiente es verificar si la malla no presenta ningún error, Al comprobar la malla, aparecen valores máximos y mínimos de abscisas y ordenadas, área y volumen mencionados en el SI, y para ello nos dirigimos a la opción **Grid-Check** figura 4.34.

File	Grid	Define	Solve	Adapt
		Í		
1	Info			+
		Polyhedra	3	•

Figura 4.34: chequeo de la malla **Fuente:** Software FLUENT.

```
Grid Check

Domain Extents:

    x-coordinate: min (m) = 0.0000000e+000, max (m) = 8.000000e+001

    y-coordinate: min (m) = -7.500000e+000, max (m) = 8.258000e+000

    z-coordinate: min (m) = 0.000000e+000, max (m) = 1.600000e+002

Volume statistics:

    minimum volume (m3): 3.159976e-002

    maximum volume (m3): 9.136181e-001

    total volume (m3): 2.017024e+005

Face area statistics:

    minimum face area (m2): 3.159999e-002

    maximum face area (m2): 1.000000e+000

    Figura 4.35: Áreas de las caras y valores máximos y mínimos de la malla.

    Fuente: Software FLUENT.
```

se trabajó en GAMBIT, para ello en la barra de tareas se escoge **Grid-Scale** Figura 4.36

Una vez chequeada la malla se procede a escalar la misma con las unidades que

Scale Factors	Unit Con	Unit Conversion			
× 0.01	Grid Wa	/as Created In cm 🖵			
Y 0.01	Chang	e Length Uni	its		
Z 0.01					
Domain Extents					
Xmin (cm) 🔋		Xmax (cm)	80		
Ymin (cm) -7.5		Ymax (cm)	8.258		
Zmin (cm) 👔		Zmax (cm)	169		
Scale	Unscale	Close	Help		
	1.04				

112

Figura 4.36: escala de la malla Fuente: Software FLUENT

Para suavizar la malla nos dirigimos a la opción **Grid-Smooth/Swap** en la cual aparecerá una ventana y por lo tanto debemos hacer clic en el botón **Smooth** una vez, luego varias veces en el botón **Swap** hasta que no haya caras intercambiadas como se muestra en la figura 4.37. Esto permite mayor calidad de la malla y resultados más exactos.

Number faces swapped: 0 Number faces visited: 0

Smooth	Swap Info
Method skewness Minimum Skewness Ø.8 Number of Iterations 4	Number Swapped 0 Number Visited 0
Smooth Swap	Close Help

Figura 4.37: suavizado de la malla **Fuente:** Software FLUENT

4.8. Definición de modelos.

Para escoger los tipos de modelos respectivos para la simulación nos dirigimos a la pestaña Define y luego a la opción Models donde procedemos a seleccionar los modelos a utilizar.

Se seleccionarán 4 tipos de modelos aplicados al colector solar de aire; estos se nombran a continuación:

- a) Solver: Sirve para encontrar un valor optimo sea mínimo o máximo dentro de una malla. Solo se presiona la opción Ok para confirmar la participación de este modelo en la simulación.
- b) Viscous: Este modelo aplica el método para analizar la turbulencia k-épsilon seleccionando la opción RNG que determina la viscosidad a partir de varias escalas de longitud de turbulencia. Se debe hacer click en Ok.
- c) Energy: Permite habilitar la transferencia de calor entre el fluido y los sólidos y resolver la ecuación de la energía. Al seleccionar este modelo solo se debe dar click en Ok.
- d) Radiatión: Dentro de este modelo se debe selecciona Solar Ray Tracing Solar Calculator donde se especifica la latitud, longitud del lugar (Portoviejo) para obtener la radiación y establecer el ángulo de inclinación del colector solar. En la figura 4.38 se observa el resultado de la radiación.

```
Fair Weather Conditions:
Sun Direction Vector: X: -0.120227, Y: -0.35013, Z: 0.928953
Sunshine Fraction: 1
Direct Normal Solar Irradiation (at Earth's surface) [W/m<sup>2</sup>]: 672.151
Diffuse Solar Irradiation - vertical surface: [W/m<sup>2</sup>]: 80.8943
Diffuse Solar Irradiation - horizontal surface [W/m<sup>2</sup>]: 65.9792
Ground Reflected Solar Irradiation - vertical surface [W/m<sup>2</sup>]: 69.0376
```

Figura 4.38: Resultado de la radiación de acuerdo a coordenadas de la ciudad Portoviejo. **Fuente:** Software FLUENT

4.9. Definición de propiedades

Para establecer la definición de propiedades de los materiales (fluido y solidos) en la pestaña **Define** se selecciona **Materials-Change/Create.** Para el fluido se debe enunciar los valores de propiedades a temperatura ambiente como se muestra en la figura 4.39.

Name air	Material Type fluid	•	Order Materials By • Name
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials		C Chemical Formula
J	air	•	Fluent Database
	Mixture		User-Defined Database
	none	·	
Properties			
Density (kg/m3)	onstant	Edit	
1	.1842		
Cp (j/kg-k) c	onstant	▼ Edit	
1	005		
Thermal Conductivity (w/m-k)	onstant	▼ Edit	
6	.0242		
Viscosity (kg/m-s)	onstant	▼ Edit	
1	.8e-05	•	
Change/Cre	ate Delete	Close He	p

Figura 4.39: definición de las propiedades del aire. **Fuente:** Software FLUENT.

En el caso de los solidos como el aislante, vidrio y acero galvanizado (placa absorbedora) se debe crear cada uno de los materiales con los datos que contiene la tabla 4.4 y guardarlos en el programa, para usarlos mas adelante en las condiciones de contorno siendo todos estos de aplicación para la simulación del colector solar de aire.

Name	Material Type		Order Materials By
aislante	solid	•	• Name
Chemical Formula	Fluent Solid Materials		C Chemical Formula
	aislante	-	Fluent Database
	Mixture		User-Defined Database
	none	-	
Properties			
Density (kg/m3)	constant 🚽 Edit	-	
	25		
Co Glica IA I			
ւր նչեն է	constant 🗾 Edit		
	1674		
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant 🗸 Edit		
	0.034		
'			
		—	
Change/Cr	eate Delete Close	He	lp

Figura 4.40: definición de las propiedades del aire. **Fuente:** Software FLUENT.

Materiales	Densidad (Kg/m ³)	Calor especifico (J/Kg ºK)	Conductividad térmica (W/m ºK)
Aislante	25	1674	0,034
Vidrio	2700	833	0,81
Acero galvanizado	7850	460	58

Tabla 4.4: Propiedades de los materiales del colector solar empleados en el software Fluent.

4.10. Definición de fronteras y condiciones de entrada

En las definiciones de fronteras y condiciones de entrada se debe tener presente que la gravedad se selecciona solo cuando el proceso a realizar es por circulación natural, en Gravitational Acceleration-Y (m/s2) se coloca el valor de la gravedad. Si la simulación es por tiro forzado simplemente se dejan los valores por defectos del programa, para ello nos dirigimos a la pestaña **Define** y seleccionamos **operate condicions.**

Pressure	Gravity
Operating Pressure (pascal)	🗆 Gravity
101325	Gravitational Acceleration
Reference Pressure Location	X (m/s2) g
X (cm) 0	Y (m/s2) 🔋
Y (cm) 👔	Z (m/s2) 👔
Z (cm)	Boussinesq Parameters
	Operating Temperature (k)
	288.16
	Variable-Density Parameters
	Specified Operating Density
ОК	Cancel Help

Figura 4.41: definición de fronteras y condiciones de entrada **Fuente:** Software FLUENT

De acuerdo a las configuraciones del programa GAMBIT en las condiciones de fronteras hay que tener en cuenta las propiedades de entrada y salida del fluido así mismo las propiedades de cada sólido para ello en la barra de tareas se ubican **Define-Boundary conditions** y se habilita una ventana como se muestra en la figura 4.42, en la cual hay que elegir cada frontera y ubicarles sus propiedades, luego de culminar se presiona **Ok**.

Velocity Inlet	×
Zone Name	
aire_entrada	
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS	
Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary	-
Reference Frame Absolute	
Velocity Magnitude (m/s) 1.98 constant	
Turbulence	
Specification Method K and Epsilon	-
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2) 1 constant	•
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3) 1 constant	
OK Cancel Help	

Figura 4.42: definición de fronteras y condiciones de entrada **Fuente:** Software FLUENT

En este estudio la velocidad con la que entra el fluido al colector solar es de 1.98 m/s y su temperatura de 300°K.

Posteriormente procedemos a realizar los cálculos de la siguiente manera:

- a) Se establecen los parámetros de entrada.
 - Hacer click en la pestaña Solve, escoger la opción Initialize → Initialize.
 - Seleccionar Velocity-Inlet debajo de Compute From y hacer clic en Init, luego en Close.
- b) Habilitar el trazado de las líneas de los residuos durante la solución
 - Hacer clic en Solve \rightarrow Monitors \rightarrow Residuals.
 - Marcar Plot en Options y hacer clic en Ok.
- c) Añadir iteraciones.
 - Hacer clic en **Solve** \rightarrow **Iterate**.
 - Introducir 100 iteraciones en Number of Iterations y hacer clic en Iterate.

Cabe señala que no se debe omitir ninguno de los pasos anteriores en los cálculos para obtener resultados precisos en la simulación CFD.

En la Figura 4.43 se muestra que todos los residuos de las variables alcanzaron criterios, que fueron impuestos, en el orden de 10^{-6} , hasta (10^{-4}) , en el caso de la energía, lo que garantiza que los valores de las variables no cambiarán en futuras iteraciones.



Figura 4.43: residuos de las iteraciones **Fuente:** Software FLUENT

4.11. Obtención de perfiles de temperatura.

Para obtener los perfiles de temperatura nos dirigimos a la pestaña **Display**, luego a la opción **Contours** donde pasamos a seleccionar en **Options** (Filled, Node **Values y Auto Range**), en **Contours of** verificamos **Temperature** y en **Surfaces** se debe escoger la entrada y salida del colector solar de aire. Por último, para obtener el valor del resultado se debe dar click en **Compute** o para obtener el comportamiento de la temperatura gráficamente dentro del colector se debe dar click en **Display**. Todas estas opciones se pueden apreciar en la figura 4.44.

Hay que tomar en consideración que para la obtención de estos resultados se deben hacer todos los pasos necesarios para la simulación, donde dependiendo del tipo de malla, las longitudes, espesores y número de sólidos este software tiende a variar el tiempo para realizar los cálculos; así mismo en ocasiones colapsa la computadora por falta de memoria gráfica.

•	Contours		×
Options	Contours of		
🗹 Filled	Temperature		-
✓ Node Values ☐ Global Range	Total Temperatu	ire	•
🗹 Auto Range	Min (k)	Max (k)	
Clip to Range	300.004	339.1680	
Draw Promes	Surfaces		<u>=</u>
Louolo Sotup	aire_derec		^
	aire_entrada		
	aire_salida		
Surface Name Patterr	aislante_dere		~
	Surface Types		
Matab	axis		^
	clip-surf exhaust-fan		
	fan		~
Display Co	mpute Close	Help]

Figura 4.44: Temperatura mínima y máxima del aire a la entrada y salida del colector. **Fuente:** Software FLUENT.

En la figura 4.45 se puede observar graficamente el comportamiento de la

temperatura y la concentración de la misma dentro del colector solar de aire.

축 ·	FLUENT [0] Fluent Inc	. 🗆 🗙
$\begin{array}{c} 3.39e+02\\ 3.37e+02\\ 3.35e+02\\ 3.33e+02\\ 3.31e+02\\ 3.29e+02\\ 3.27e+02\\ 3.27e+02\\ 3.25e+02\\ 3.25e+02\\ 3.26e+02\\ 3.16e+02\\ 3.16e+02\\ 3.14e+02\\ 3.14e+02\\ 3.14e+02\\ 3.14e+02\\ 3.08e+02\\ 3.08e+02\\ 3.08e+02\\ 3.04e+02\\ 3.02e+02\\ \hline \\ \hline$		
Contours of Total Temperature (k)	Dec 5 FLUENT 6.3 (3d, pbns	1, 2016 , mgke)

Figura 4.45: Comportamiento de temperatura en un colector solar con aletas (aleta 10). **Fuente:** Software FLUENT.

4.12.1. Rendimiento energético.

Datos:

$$\begin{split} \dot{m} &= 0,019 \, Kg/s \\ C_p &= 1005 \, J/Kg \, {}^\circ K \\ T_{f.sal} &= 339,168 \, {}^\circ K \\ T_{f.ent} &= 300 \, {}^\circ K \\ A_{Abs} &= 1,28 \, m^2 \\ G_T &= 672,151 W/m^2 \\ \eta_{En} &= \frac{Q_{\dot{U}til}}{A_{Abs} \, G_T} \\ \eta_{En} &= \frac{\dot{m} \, C_p \, (T_{f.sal} - T_{f.ent})}{A_{Abs} \, G_T} \\ \eta_{En} &= \frac{0,019 \, \frac{kg}{s} * 1005 \, \frac{J}{kg^\circ K} (339,168 - 300)^\circ K}{1,28 \, m^2 * 672,151 \frac{W}{m^2}} \\ \eta_{En} &= 86,93 \, \% \end{split}$$

4.12.2 Incremento de flujo de exergía en el fluido.

Datos:

$$\dot{m} = 0,019 \, Kg/s$$

 $C_p = 1005 \, J/Kg \,^{\circ}K$
 $T_{f.sal} = 339,168 \,^{\circ}K$
 $T_{f.ent} = 300 \,^{\circ}K$
 $T_{amb} = 302 \,^{\circ}K$

$$\Delta \dot{E} x_{f} = \dot{m} C_{p} \left[\left(T_{f.sal} - T_{f.ent} \right) - T_{amb} l_{n} \left(\frac{T_{f.sal}}{T_{f.ent}} \right) \right]$$
$$\Delta \dot{E} x_{f} = 0.019 \frac{Kg}{seg} 1005 \frac{J}{Kg \,^{\circ}K} \left[(39.168^{\circ}K) - 302^{\circ}K \, l_{n} \left(\frac{339.168}{300} \right) \right]$$
$$\Delta \dot{E} x_{f} = 0.0402 \, \mathrm{KW}$$

4.12.3. Tasa de exergía de la radiación solar incidente.

Datos:

$$\begin{aligned} T_{amb} &= 302 \,^{\circ}K \\ T_{sol} &= 5800 \,^{\circ}K \\ A_{Abs} &= 1,28 \, m^2 \\ G_T &= 672,151W/m^2 \\ \dot{E}x_{rad.sol} &= A_{Abs}G_T \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)^4 \right] \\ \dot{E}x_{rad.sol} &= 1,28 \, m^2 \, 672,151W/m^2 \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{302}{5800} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{302}{5800} \right)^4 \right] \\ \dot{E}x_{rad.sol} &= 0,8006 \, KW \end{aligned}$$

4.12.4. Destrucción de exergía del colector solar de placa plana.

Datos:

$$\begin{split} \eta_{op} &= 0.843 \\ A_{Abs} &= 1.28 \ m^2 \\ G_T &= 672.151 W/m^2 \\ T_{amb} &= 302 \ ^{\circ}K \\ T_{Abs} &= 360.27 \ ^{\circ}K \\ T_{sol} &= 5800 \ ^{\circ}K \\ \dot{E}x_{dest.sol-Abs} &= A_{Abs} G_T \left(1 - \eta_{op} + \eta_{op} \frac{T_{amb}}{T_{Abs}} - \frac{4}{3} \frac{T_{amb}}{T_{sol}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)^4 \right) \end{split}$$

$$\dot{E}x_{dest.sol-Abs} = 1,28m^2 \ 672.151 \frac{W}{m^2} \left[1 - 0,843 + 0,843 \left(\frac{302}{360,27} \right) - \frac{4}{3} \left(\frac{302}{5800} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{302}{5800} \right)^4 \right]$$

 $\dot{E}x_{dest.sol-Abs} = 0.6833 \, KW$

4.12.5. Exergía Transferida de la placa absorbedora al fluido.

Datos:

$$\dot{m} = 0,019 \, Kg/s$$

$$C_p = 1005 \, J/Kg \,^{\circ}K$$

$$T_{f.sal} = 339,168 \,^{\circ}K$$

$$T_{f.ent} = 300 \,^{\circ}K$$

$$T_{amb} = 302 \,^{\circ}K$$

$$T_{Abs} = 360,27 \,^{\circ}K$$

$$\dot{E}x_{Abs-fluido} = \dot{m}_{fluido} C_p \left[\left(T_{f.sal} - T_{f.ent} \right) \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{Abs}} \right) \right]$$

$$\dot{E}x_{Abs-fluido} = 0,019 \frac{Kg}{s} * 1005 \frac{J}{Kg \,^{\circ}K}$$

$$\left[(339,168 - 300)^{\circ} K \left(1 - \frac{302}{360,27} \right) \right]$$

 $\dot{E}x_{Abs-fluido} = 0,1209 \, KW$

4.12.6. Eficiencia exergética del colector solar.

Datos:

$$\dot{m} = 0,019 \, Kg/s$$

 $C_p = 1005 \, J/Kg \,^{\circ}K$
 $G_T = 672,151W/m^2$

$$T_{f.sal} = 339 \,^{\circ}K$$

$$T_{f.ent} = 300 \,^{\circ}K$$

$$T_{amb} = 302 \,^{\circ}K$$

$$T_{sol} = 5800 \,^{\circ}K$$

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{m}C_p \left[(T_{f.sal} - T_{f.ent}) - T_{amb} l_n \left(\frac{T_{f.sal}}{T_{f.ent}} \right) \right]}{A_{Abs} \, G_T \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)^4 \right]}$$

$$\eta_{Ex} = \frac{0,0402 \, KW}{0,8006 \, KW}$$

 $\eta_{Ex} = 5,02 \%$

Se considera que la temperatura es una variable térmica que siempre tiende a variar por lo cual en el software fluente en definición de modelos-solar calculator se obtubieron resultados de la radiación a diferente horas, en el dia 12 de diciembre de 2016 con lo que se adquirieron diferentes valores de las variables térmicas del colector solar, para la aleta 10 en la tabla tabla 4.5 se muestran los resultados que se lograron obtener destacando el periodo de tiempo (12:00 -13:00) pm como el adecuado para que opere el colector solar de aire.

Hora	T _{Ent} (°K)	T _{Amb} (°K)	T _{Abs} (°K)	GT (W/m2)	T _{Sal} (°C)	η _{En} (%)	$\begin{array}{c} \Delta \dot{E} x_f \\ (\mathrm{KW}) \end{array}$	Ėx _{dest} (KW)	η _{Ex} (%)
10:00	26	27,5	61,35	629.878	62,004	77,68	0,035	0,637	3,97
11:00	26,3	27,9	66,49	659.403	64,895	84,10	0,039	0,669	4,28
12:00	26,8	28,8	80,61	672.088	66,149	86,78	0,040	0,680	5,01
13:00	27	29	87,27	672.157	66,168	86,93	0,040	0,683	5,02
14:00	26,5	28	66,97	659.612	64,933	84,18	0,039	0,670	4,37
15:00	26,1	27,6	62,24	630.301	62,112	77,92	0,035	0,647	4,02

 Tabla 4.5: Variables térmicas del colector solar con aleta 10 obtenidos respecto a diferentes horas en el 12/dic/2016

En la tabla 4.6 se puede apreciar los 10 tipos de aletas con su respectiva temperatura de salida del aire y sus valores correspondientes de variables térmicas obtenidas en el colector solar al simular el uso de cada aleta. Cabe indicar que se usó el día 12 de diciembre de 2016 a las 13:00 donde se obtuvo la radiación más elevada.

Aleta	T _{Sal} (°C)	η _{En} (%)	$\Delta \dot{E} x_f$ (KW)	Ėx _{des} (KW)	η _{Ex} (%)
Aleta 1	59,003	76.15	0,026	0,683	3,31
Aleta 2	57,895	75,85	0,024	0,683	3,08
Aleta 3	60,547	76,83	0,029	0,683	3,66
Aleta 4	65,006	84,35	0,037	0,683	4,72
Aleta 5	60,223	76,64	0,028	0,683	3,58
Aleta 6	66,024	86,61	0,039	0,683	4,99
Aleta 7	57,248	75,11	0,023	0,683	2,95
Aleta 8	62,448	78,02	0,032	0,683	4,10
Aleta 9	65,235	84,86	0,038	0,683	4,78
Aleta 10	66,168	86,93	0,040	0,683	5,02

Tabla 4.6: Variables térmicas del colector solar con los 10 tipos de aleta en el día12/dic/2016 a las 13:00

4.13. Análisis y discusión de resultados.

Una vez que se han realizado cada uno de los pasos necesarios para efectuar la simulación, en el software fluent, de las 10 aletas respectivas se realizan análisis y comparaciones entre las mismas para así selecciónar la más factible a mejorar el rendimiento exergético del colector solar en operación real.

En el gráfico 4.1 se puede apreciar el resultado de la temperatura del aire a la salida del colector solar respecto a la simulación del mismo para cada una de las 10 placas aleteadas cuta geometria fue creada en el software Gambint.



Gráfico. 4.1. Temperatura del aire a la salida del colector solar de acuerdo al tipo de aleta, a las 13:00 del 12/dic/2016

Como puede observarse existe una diferencia mínima de temperatura del aire a la salida del colector con el aporte de aletas en la placa absorbedora, como las del tipo 4, 6, 9 y 10 que son las que presentan temperaturas mas elevadas.

La aleta seleccionada para establecerla en el colector solar es la número 10 donde la temperatura del aire a la salida del colector corresponde a 66.168 °C identificandola como la mas sobresaliente para mejorar el rendimiento exergético en el colector solar.

En el gráfico 4.2 se muestra la variación de la temperatura de salida del aire con respectos a las horas del dia 12 de diciembre de 2016.



Gráfico 4.2: Temperatura de salida del aire vs horas del día.

En el gráfico 4.3 se puede observar la temperatura de salida del aire con relación a la eficiencia exergética de cada placa aleteada.



Gráfico 4.3: Temperatura de salida vs rendimiento exergético de placa absorbedora con los 10 tipos de aletas

La inclinación del colector en la presente investigación fue de 17°, para decidir si el ángulo es el adecuado se realizaron los cálculos y la simulación respectiva en el software Fluent - Solar calculator - Grid orientation. En la tabla 4.6 se puede apreciar la temperatura del aire a la salida del colector respecto a varios ángulos de inclinación, donde se observa que con el ángulo e 12° la temperatura es 66.216 °C siendo este el valor máximo, mientras que con el ángulo de 20° la temperatura es 66.003 °C siendo éste el valor mínimo. Cabe indicar que la hora utilizada para los cálculos en la simulación del ángulo es 13:00 donde la radiación es mayor.

θ	Tsal (°C)
12	66,216
14	66,024
16	66,095
17	66,168
18	66,113
20	66,003

Tabla 4.7: Temperatura de salida del aire respecto al ángulo de inclinación.

En el grafico 4.4 se observa la curva de la temperatura del aire a la salida del colector solar respecto al ángulo de inclinación donde se puede denotar que la variación de temperatura del aire a la salida es mínima.



Gráfico 4.4: Temperatura de salida del aire vs ángulo de inclinación.

El gráfico 4.5 representa en el eje de las abscisa y ordenada, el rendimiento energético con la temperatura de salida del fluido del colector solar donde el flujo másico es constante.



Gráfico 4.5: Temperatura de salida vs Rendimiento energético.

El gráfico 4.6 representa en el eje de las abscisa y ordenada, el rendimiento energético con la exergía ganada por el aire donde el flujo másico es constante. Estos datos fueron obtenidos el 12/dic/2016 a partir de las 10:00 – 13:00 hasta el punto donde la radiación solar es la más alta, de acuerdo a la simulación efectuada en FLUENT.



Gráfico 4.6: Exergía ganada por el fluido vs Rendimiento energético.

El gráfico 4.7 representa en el eje de las abscisa y ordenada, la temperatura ambiente con la exergía ganada por el fluido donde el flujo másico y el rendimiento energético son constantes.



Gráfico 4.7: Exergía ganada por el fluido vs Temperatura ambiente.

El gráfico 4.8 representa en el eje de las abscisa y ordenada, la temperatura ambiente con el rendimiento exegético donde el flujo másico y el rendimiento energético son constantes.



Gráfico 4.8: Rendimiento exergético vs Temperatura ambiente.

El gráfico 4.9 representa en el eje de las abscisa y ordenada, el flujo de masa de aire con la exergía ganada por el fluido donde la temperatura ambiente es constante.



Gráfico 4.9: Exergía ganada por el fluido vs Flujo másico.

El gráfico 4.10 representa en el eje de las abscisa y ordenada, el rendimiento exergético con el flujo de masa del aire donde la temperatura ambiente es constante.



Gráfico 4.10: Rendimiento exergético vs Flujo másico.

4.14. Características del colector de mayor eficiencia para su construcción.

Una vez obtenidos los resultados del colector solar placa plana de aire a través de la simulación CFD con la integración del software de diseño GAMBINT y de cálculos FLUENT se procede a enunciar los parámetros definitivos para la construcción:

a) Carcasa del colector solar.

• Material: Acero galvanizado 1/20".

b) Placa absorvedora.

- Material: Acero galvanizado 1/16".
- Longitud: 160 cm.
- Ancho: 80 cm.
- Revestimiento: Pintura negro mate.

c) Aislante inferior.

- Material: Poliestireno expandido.
- Longitud: 160 cm.
- Ancho: 80 cm.
- Altura: 7.5 cm

d) Aislantes laterales.

- Material: Poliestireno expandido.
- Longitud: 160 cm.
- Ancho: 5 cm.
- Altura: 7.5 cm

e) Cubierta transparente.

- Material: Vidrio común.
- Longitud: 160 cm.
- Ancho: 80 cm.
- Altura: 6 cm

f) Aleta.

- Material: Acero galvanizado 1/16".
- Tipo: Aleta 10, agujeros a tres bolillos.
- Diámetro de agujeros: 0.5 cm
- Separación entre agujeros. 7.9 cm
- Longitud de 80 cm.
- Ancho: 1/16"
- Altura: 1.5 cm
- Distancia de separación entre aletas: 14 cm

g) Espacio del fluido.

• Cabe indicar que el espacio por donde va a pasar el aire dentro del colector solar es la separación entre la placa absorbedora y la cubierta transparente, siendo esta de 7,5 cm.

h) Velocidad de entrada del fluido.

• La velocidad de entrada es de 1.98 m/s. Se recomiendan ventiladores con baja potencia para obtener velocidades dentro del rango de 1 a 2 m/s para lograr buenos rendimientos en el colector solar.

i) Ángulo de inclinación.

• El ángulo de inclinación es de 12°.

j) Orientación del colector solar.

• Tomando en consideración la latitud de la ciudad de Portoviejo -1.05 Sur, la orientación para colector solar es hacia el Norte.

k) Periodo de trabajo recomendable.

 El periodo de tiempo de 12:00 – 13:00 es el idóneo para que opere el colector solar, donde la radiación del sol es mayor.

En la fig. 4.6 se muestra un diseño definitivo de colector solar de placa plana de aire renderizado de acuerdo a los materiales para la construcción del mismo.



Fig. 4.46: Modelo de colector solar de placa plana de aire renderizado.

4.15. Verificación de objetivos específicos.

4.15.1. Verificación del objetivo específico uno.

A través de un análisis en el colector solar de placa plana se determinó la transferencia calor útil en el fluido de trabajo, donde primero se tomó en consideración que la energía recibida en el absorbedor será la diferencia entre la radiación incidente y las pérdidas ópticas, donde por consiguiente la primera transferencia de calor es por la radiación del sol hasta la placa colectora para después transferir este calor desde el absorbedor al aire.

4.15.2. Verificación del objetivo específico dos.

Mediante la simulación CFD se realizaron diversos análisis en el colector solar de placa plana donde se obtuvieron resultados para optimizar las variables geométricas del mismo y aprovechar de una mejor manera las variables térmicas que intervienen.

Cabe indicar que unos de los parámetros de mayor importancia a considerar en esta investigación es la separación entre la placa absorbedora y la cubierta transparente, ya que, de acuerdo a una optimización factible de este espacio para el paso del aire, existe una buena concentración de temperatura. Así mismo se establecieron periodos de tiempo durante el día y nuevos ángulos de inclinación en el colector solar con el fin de aprovechar al máximo la radiación solar.

Por último, se determina que la velocidad de flujo de aire en la entrada del colector solar no debe ser muy alta ya que puede causar muchas pérdidas térmicas reduciendo la eficiencia en el sistema.

4.15.3. Verificación del objetivo específico tres.

Se determinó la eficiencia exergética del colector solar simulado mediante la aplicación de modelos matemáticos y formulas debatidas con el tutor de la investigación, donde se obtuvieron resultados factibles que indican mejoras en el rendimiento del colector solar placa plana de aire.

4.16. Comprobación de la hipótesis.

La Simulación CFD de los parámetros térmicos y geométricos de colectores solares placa plana de aire con tiro forzado permitirá elevar la eficiencia en los procesos de secado de grano del sector agrícola.

La hipótesis planteada se comprueba, resultando ser afirmativa debido a que la investigación realizada sobre la simulación CFD para optimizar las variables geométricas en colectores solares de aire permite reducir las pérdidas de calor en el mismo, aprovechando de una mejor manera las variables térmicas y obteniendo una mejor eficiencia, siendo esta de múltiple utilidad al momento de operar el colector como, por ejemplo: calefacción, procesos de secado de granos u otros productos.

4.17. Resultados alcanzados.

La presente investigación se realizó mediante un estudio a colectores solares de placa plana de aire tradicionales donde se pudo observar que los principales factores a considerar para un mejor aprovechamiento en el colector y obtener un rendimiento más elevado en el mismo son:

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.

Dentro de las dimensiones del colector cabe indicar que la altura de 7,5 cm es la idónea como espacio para que el aire pase dentro del colector ya que se puede obtener una buena concentración de temperatura.

Para aprovechar la radiación solar más alta y por ende las variables térmicas según la referencia del software Fluent el periodo de tiempo óptimo es 12:00-13:00 con un ángulo de inclinación de 12º hacia el Norte.

La velocidad de entrada del aire en el colector no debe ser muy elevada, siendo 1,98 m/s una velocidad adecuada para trabajar, en comparación con velocidades desde 3 hasta 6,8 m/s las cuales producen excesivas pérdidas de calor. (Vélez E y Zambrano J, 2017).

Los resultados obtenidos con la simulación CFD, logran elevar el rendimiento del colector solar tradicional sin aletas ya que con la optimización de las variables geométricas y el estudio de las variables térmicas que inciden en el colector solar de placa plana se disminuyen las irreversibilidades y se aprovecha de mejor forma la transferencia de calor en el colector y concentración de temperatura con la aplicación de aletas que producen turbulencia en la dinámica del aire.

Así mismo estos resultados serán de mucha utilidad para modernización en colectores solare beneficiando principalmente a comerciantes y agricultores que realizan el secado de grano de forma tradicional, reduciendo en gran porcentaje desventajas como:

Secado directamente expuesto al sol, recibiendo impurezas, que el producto no sea secado en su totalidad de forma equivalente, de igual manera secado en máquinas que usan combustibles de origen fósil que emiten un alto grado de contaminación al ambiente y mayor uso de los recursos del planeta. Otro factor importante es el tiempo de secado que se consume en el proceso tradicional, por lo general en el secado de granos habitual el tiempo es de 3 a 4 días mientras que con un colector solar su duración varia de 4 a 5 horas manteniendo el producto libre de impurezas, esto nos equivale a un desarrollo de secado más eficiente, ahorro de tiempo, dinero y reducción de contaminación.

4.18. Conclusiones y recomendaciones.

4.18.1. Conclusiones.

- Se determinó que el rendimiento exergético es un parámetro útil para medir las mejoras introducidas en un colector solar placa plana de aire tiro forzado, tanto en cuanto a la disminución de la exergía perdida como en cuanto al aprovechamiento de flujos de exergía recuperable, y de acuerdo a esta eficiencia exergetica en la simulación CFD de un colector solar aleteado se estableció que su rendimiento es más elevado que el de un colector solar placa plana sin aletas referente al trabajo de titulación de Zambrano J y Vélez E.
- Se concluyó que, si se reduce el espacio del aire en los colectores de placa plana de aire de tiro forzado, la transferencia de calor de la placa al fluido aumenta, la cual permite elevar su eficiencia.
- En este estudio de acuerdo a la turbulencia se concluyó que este régimen se caracteriza por su baja difusión de momento, alta convección y cambios rápidos de presión y velocidad, y para ello para excluir estos cambios se definió un aleteado a la placa absorbedora la cual afecta la dinámica del aire consiguiendo diversos efectos como eliminar o controlar la turbulencia generada, y evitar roturas de la capa límite del aire y de esta manera hacer que el fluido gane energía durante la transición, también se comparó que el régimen de la turbulencia cambia según el tipo de aleta durante la simulación CFD.

- El flujo de masa depende de la densidad, velocidad y del área y para ello en el análisis CFD se concluyó que la variable de la velocidad en los colectores solares es muy importante, y se comprobó que a mayor velocidad, el fluido tarda poco tiempo pasar por el colector y por ello existirá poca transferencia de calor al fluido, y a menor velocidad el fluido tarda más en el colector solar en la cual aumenta la transferencia de calor, entonces en este estudio se logró determinar una velocidad de entrada capaz de lograr la mayor transferencia de calor teniendo en cuenta el tipo de aleteado, y de esta manera elevar la eficiencia del colector solar.
- Se concluye este trabajo de titulación que las horas de trabajo de los colectores solares es a partir de las 10:00-15:00 GMT: (00:00) y que el tiempo de mayor eficiencia es a las 13:00 con un ángulo de 12º hacia el norte, con un rendimiento exergético de 37.58 %.

4.18.2. Recomendaciones.

- Cuando se trabaja en el programa GAMBIT se escoge una medida de longitud de acuerdo al diseño de un sistema, una vez creada la geometría, mallado con las condiciones de contorno respectivas se exporta para luego trabajar en FLUENT, el cual para poder trabajar en el programa y para que los cálculos sean los correctos se debe trabajar con las mismas unidades con las que se trabajó en GAMBIT, caso contrario los cálculos saldrán, pero serán incorrectos.
- Se recomienda seguir un orden específico de los pasos para el diseño de la geometría en GAMBIT y también para para la solución mediante FLUENT.
- Se necesita un ordenador que posea mayor capacidad de memorias internas (RAM, ROM y Tarjeta gráfica), para un óptimo mallado en GAMBIT y una rápida simulación en FLUENT.

• Se recomienda hacer más iteraciones en los cálculos respectivos del programa para que los resultados sean más precisos, cuando hay convergencia durante las iteraciones quiere decir que el resultado no cambiara más con iteraciones futuras es decir el valor del resultado final de la convergencia se hace constante.

4.19. Presupuesto.

	VALORES	
1	Transporte de materiales.	\$70.00
2	Materiales, suministros para la construcción del colector.	\$100.00
3	Ventilador Centrífugo de aire.	\$50.00
4	Gastos de alimentación.	\$100.00
5	Material bibliográfico y fotocopias.	\$150.00
6	Gastos del Trabajo de Titulación.	\$50
7	Varios e imprevistos	\$70.00
ТО	\$590,00	

En el presupuesto de la presente investigación "Simulación CFD de un colector solar placa plana de aire con tiro forzado para elevar la eficiencia en el proceso de secado de granos en el sector agrícola". Se informa detenidamente los gastos en los requerimientos que tuvo el proyecto conteniendo una lista de productos y servicios que se requirió para el desarrollo, investigación, documentación, corrección e impresión de dicho proyecto.

4.20. Cronograma.

ACTIVIDAD		SEMANA																		
ТІЕМРО	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Recopilación Bibliográfica.	X																			
Estudio de los antecedentes.		X																		
Análisis de las técnicas en la investigación			X																	
Técnicas del proyecto de investigación.				X																
Desarrollo de la investigación.					X	X	X	X												
Investigación sobre energía solar.									X											
Investigación en colectores solares.										X										
Investigación sobre simulación CFD.											X									
Diseño del colector en Gambit.												X								
Diseño de las alteas en Gambit.													X							
Diseño de la investigación.														X						
Toma de datos reales en el colector solar															X					
Modelación en software Fluent.																X				
Comparación y análisis de resultados.																	X	X	X	
Verificación de objetivos.																				X
Conclusiones y recomendaciones.																				X
BIBLIOGRAFÍA

- Jose Carta González, A. C. (2009). Centrales de energías renovables. Madrid (España): www.pearsoneducacion.com.
- Montero Irene. (2005). Modelado y construcción de un secadero solar hibrido para residuos biomásicos. Tesis de doctorado. Universidad de Extremadura Badajoz, España. Recuperado de: dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/576.pdf
- ASADES. (2011). Docplayer. Obtenido de www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2011/2011-t002-a003.pdf
- Bayón, I. A. (2015). Modelación de un colector solar para calentamiento de aire. La Habana-Cuba: Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000300007
- Capilla, A. V. (2012). evaluacion del agotamiento del capital mineral de la tierra. España: Ediciones de las Ciencias Geologicas.
- Construpedia. (11 de junio de 2016). radiacion solar. Obtenido de http://www.construmatica.com/construpedia/Radiaci%C3%B3n_Solar
- Ekilokitos. (13 de septiembre de 2009). radiacion solar. Obtenido de http://radiacionsolarekolokitos.blogspot.com/2009/09/tipos-de-radiacion-solar.html
- El clima de la tierra. (s.f.). Recuperado el 04 de 07 de 2016, de http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclimS/contenu/alternative/alter2_textes.html
- EL PAIS DE LAS AMAPOLAS. (14 de 03 de 2011). Obtenido de http://elpaisdelasamapolas.blogspot.com/2011/03/uranio-y-agua-de-bolivia-parairan.html
- Fundamentals, A. H. (1989). American Society of Heating. Nueva York: Refrigeration and Air Conditioning Engineers.
- Gonzalez, G. C. (2010). Construcción de un secador solar. Quintana Roo.
- Guisan, O. (1989). cours d'Energíe Solaire. Universite de Geneve.
- Gutiérrez, M. A. (2014). Laboratotio Virtual de Fenomenos de Transporte. La Habana Cuba.
- Johane Hans Bracamonte, Miguel Leonardo Baritto. (2013). Análisis de las irreversibilidades en colectores solares de placas planas no isotérmicos para calentamiento de aire utilizando un modelo adimensional. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 2), 240-242.

- Lang, C. E. (20 de 03 de 2014). SENER (Secretaria de Energia). Recuperado el 22 de 07 de 2016, de CONUEE (Coision Nacional para el uso Eficiente de la Energia): http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/que_es_la_energia_solar
- Lema A, Pontin M, Morsetto J, Ruetsch L. (2011). Diseño, desarrollo y análisis térmico de un colector solar de aire con placa plana. Eficiencia y exergía perdida. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15., 18-19.
- Maza, S. (2008). Energía Solar Térmica. México: innovacióny cualificación .
- Montoya L, P. J. (2011). Evaluación de un calentador solar de agua de acuerdo a Norma Técnica Peruana. XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente , 2.
- Payoloco. (10 de 08 de 2014). safety-car.es. Recuperado el 29 de 07 de 2016, de http://safety-car.es/thread-5626.html
- Peauser, Heinz Remmers, Schnauss. (2005). Sistemas solares térmicos, diseño e instalación. Sevilla, España: CENSOLAR.
- Reinoso, D. D. (2014). ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA GENERACIÓN DE. Ecuador-Cuenca: http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20895/1/Tesis.pdf.
- Solar, r. (s.f.). Recuperado el 30 de 06 de 2016, de http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7542/Capitulo3.pdf
- Solís, G. (2004). Energías Renovables . México: Trillas.
- Soto, A. B. (14 de 03 de 2016). clentadores solares de agua. Obtenido de http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj_2016/bol325_calentadores_solare s.asp
- Villanueva, A. G. (09 de 07 de 2015). Estudio cfd del flujo turbulento alrededor de álabes de turbomáquinas con modelo trans sst. Barcelona. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/79506/TFG_memoria.pdf?seque nce=2&isAllowed=y
- Tous, M. R. (2009). Energía Solar Térmica. Barcelona (España): www.editorialceac.com.
- H.K. Versteeg, W. M. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method.
- UNIVERSITY, I. (20 de 08 de 2015). kb.iu.edu. Obtenido de https://kb.iu.edu/d/axyy

- Yunus A. Çengel, Michael A. Boles. (2012). Termodinámica. Mexico: McGraw-Hill.
- Bioclimática, E. R. (2012). E. Renovables y Arquitectura. Recuperado el 08 de 2016, de http://erenovablesarqbioclimatica.blogspot.com/2012/02/energia-solar-termica-de-baja_04.html
- Gonzáles Acuña Raúl. (2012). Caracterización y optimización exergética de un colector solar de placa plana para desalinización solar. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar, Venezuela. Recuperado de: http://159.90.80.55/tesis/000155987.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
- 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/
- Guasch Antoni, Piera Miguel, Casanovas Josep, Figueras Jaume. (2002). "Modelado y simulación: Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. España.: Universidad Politécnica de Catalunya, SL. Recuperado de: https://books.google.com.ec/books?id=KZDPoE0uWTkC&printsec=frontcover&dq =SIMULACI%C3%93N+LIBROS&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiqtLydybLLAhWCWz4KHQLTCY4Q6AEILDAD#v=onepage&q=SIMULACI%C3%93N%20LIBROS&f=false
- Pérez, L. B., & Alvarez, M. (2012). *Cuba Sol*. Recuperado el 2016, de http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar08/HTML/articulo03.htm
- Pita, L. (2016). Ingeniero Mecánico .

ANEXOS

ANEXO Nº 1 Mapas de la radiación promedio global.



Radiación promedio solar en el mundo.



Radiación directa promedio anual en el Ecuador.



Radiación difusa promedio anual en el Ecuador.

ANEXO Nº 2

Toma de valores reales de variables térmicas y geométricas de un colector solar de placa plana con tiro forzado.



Identificación de tipos de materiales presentes en el colector solar de aire.



Toma de medidas geométricas del colector solar.



Toma de medidas de temperatura de la placa del colector solar con cámara fototermica FLIR E49001.



Toma de medidas de velocidades y temperaturas a la entrada y salida del colector solar con anemómetro HYELEC MS6252Y.

ANEXO Nº 3 Interfaz gráfico del paquete Hummingbird CFD.



Entorno de trabajo del software de diseño GAMBIT 2.2.30.



Entorno de trabajo del software de cálculo FLUENT 6.3.26

ANEXO Nº 4

Resultados en la simulación CFD respecto a concentración de temperaturas de las mejores placas aleteadas.



Temperatura total de placa con aleta 4



Temperatura total de placa con aleta 6.



Temperatura total de placa con aleta 9



Temperatura total de placa con aleta 10.

ANEXO Nº 5

Resultados de encuestas realizadas a 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

Encuestas dirigidas a docentes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Manabí.

Objetivo. Determinar si es viable la modelación de un colector solar para la mejora de su eficiencia, generalizado en el sector agrícola.

1. ¿De acuerdo a los tipos de secado de granos en las industrias cuál de estos es el más utilizado?

Opciones de respuesta.	Respuesta	Porcentaje
Secado de granos de forma natural.	7	70
Secado de granos en colectores solares.	0	0
Secado de granos con máquinas eléctricas o térmicas.	3	30
Total	10	100





Podemos denotar con relación a la pregunta número uno que la mayor parte de los ingenieros mecánicos encuestados afirman que el método más utilizado para secar granos en las industrias es de forma natural, es decir directamente expuesto al sol.

2. En base a su experiencia, ¿Considera usted que los procesos de secado de granos con máquinas que utilizan combustible fósil son factibles en industrias del secado?

Opciones de	Respuesta	Porcentaje
respuesta.		
Si.	6	60
No.	4	40
Total	10	100





Los resultados de la pregunta número dos, permiten evidenciar que la mayor parte de los ingenieros mecánicos encuestados, consideran que si es factible que los procesos de secado de granos se realicen en máquinas que usen combustibles, ya que es la forma más económica de efectuar dichos procesos.

Opciones de	Respuesta	Porcentaje
Si.	8	80
No.	2	20
Total	10	100

3. ¿Considera usted que el colector solar de placa plana de aire es un dispositivo rentable para un secado óptimo de granos?





La respuesta del total de encuestados es casi contundente al considerar que el secado de granos en colectores solares de placa plana de aire sería más rentable y óptimo, destacando la utilización de energía renovable, reduciendo la contaminación y no agotando los recursos del planeta.

Opciones de respuesta.	Respuesta	Porcentaje
Si.	9	90
No.	1	10
Total	10	100

4. ¿Tiene usted conocimientos respecto a los tipos de técnicas de simulación digital de colectores solares?





En base a la pregunta número cuatro se confirma por medio del mayor porcentaje, que los ingenieros mecánicos si poseen conocimientos sobre las técnicas de simulación digital de colectores solares. 5. ¿Considera usted que la modelación de un proceso real de transferencia de calor es beneficioso para el investigador porque permite modificar diferentes variables para obtener resultados más factibles?

Opciones de respuesta.	Respuesta	Porcentaje
Si.	10	100
No.	0	0
Total	10	100





Como se puede observar en la pregunta número cinco, se afirma que el total de ingenieros mecánicos encuestados consideran beneficio la modelación en procesos de transferencia de calor, dando a entender que la simulación es algo indispensable actualmente para resolver problemas de la realidad.

Opciones de respuesta.	Respuesta	Porcentaje
Si.	5	50
No.	5	50
Total	10	100

6. ¿Conoce usted cuál es la importancia de la simulación CFD y su incidencia en el flujo de fluidos?





Según los resultados basados en la pregunta número seis, se puede verificar que la mitad de los ingenieros mecánicos poseen conocimientos acerca de la simulación CFD y de la importancia de la misma referente al flujo de fluidos, dando a entender que se debe experimentar más con estos tipos de software para comprender sus diversas aplicaciones en el mundo real.

Opciones de respuesta.	Respuesta	Porcentaje
FLUENT.	1	10
SOLIDWORKS.	3	30
CFD AUTODESK.	0	0
ANSYS.	0	0
MATLAB.	4	40
OTROS.	2	20
Total	10	100

7. ¿Qué tipos de programas ha utilizado para una simulación de algún proceso de flujos de fluidos?





Los resultados de la pregunta número siete demuestran que de la totalidad de ingenieros mecánicos encuestados la mayor parte de ellos utilizan el software Matlab para realizar cálculos y procesos de simulación, dejando en segundo lugar al Solidworks, así mismo se puede observar que en tercer lugar un porcentaje de ingenieros mecánicos usan otros tipos de software para simular, mientras que la minoría usa Fluent, dejando en último lugar a los software CFD Autodesk y ANSYS los cuales no son usados por ningún ingeniero mecánico encuestado.