



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Diseño y simulación de chimenea solar con ángulo de inclinación y cambio de geometría en el colector y aceleración del flujo en la chimenea

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**Presenta:
Miguel Agustín Heredia Vázquez**

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Ricardo Beltrán Chacón**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Ángel Marroquín de Jesús**

CHIHUAHUA, CHIH.

JUNIO, 2014

Resumen

La creciente escasez de recursos energéticos fósiles, con el consecuente incremento de sus costos, así como sus dañinos efectos ambientales asociados a las técnicas actuales de generación de energía eléctrica convencionales hacen inminente y urgente el desarrollo de tecnologías sustentables y renovables, dentro de las cuales destaca el sistema solar de chimenea por su principio de funcionamiento altamente sostenible y mínimo impacto ambiental.

Conociendo que una de las limitaciones para el uso extensivo de esta tecnología es la disponibilidad y captación de la radiación solar útil, y la conversión de ésta en energía térmica, y consecuentemente, en energía cinética del aire; en el presente trabajo se investigó la optimización en el aprovechamiento de la energía solar disponible mediante la sustitución del tipo de colector horizontal con chimenea cilíndrica convencional por un sistema con colector inclinado triangular convergente y chimenea convergente.

Para realizar el análisis del sistema propuesto se desarrolló una herramienta computacional de los principales componentes que conforman el sistema; colector solar y chimenea.

Se realizó una validación del simulador utilizando datos teóricos y experimentales reportados en la literatura, de donde se obtuvieron resultados satisfactorios. Se propone además una metodología para la determinación del ángulo óptimo de inclinación del colector en función del lugar geográfico proyectado del emplazamiento.

En relación al sistema convencional, los resultados obtenidos indican que en el sistema propuesto, con la elección del ángulo óptimo de inclinación del colector en el lugar del emplazamiento modelado es posible lograr un incremento del 6.8% promedio anual en la captación de radiación solar, incrementar la radiación solar promedio mensual absorbida un 11.38%, y en el flujo de calor un 49.75%. También con el cambio en la geometría del colector y de la chimenea, las simulaciones realizadas en software que utiliza técnica de elemento finito indican que es posible incrementar la velocidad del flujo a la salida del colector hasta en 762%, la diferencia de presión total generada y la diferencia de presión disponible para ser extraída por la turbina un 601%. De igual manera, en la chimenea convergente se obtiene una eficiencia de conversión de energía térmica en flujo para la potencia disponible de 60%.

El sistema propuesto es técnicamente atractivo y competitivo como alternativa sustentable para la generación de energía eléctrica, no obstante aún presenta retos en cuestión de optimización de diseño y dimensiones.

Abstract

The growing scarcity of fossil fuels, with the consequent increase in their costs and their harmful environmental effects associated with current techniques for conventional power generation making imminent and urgent to develop sustainable and renewable technologies, among which stands out the system Solar chimney for its first fully sustainable operation and zero gas emissions and wastes contributing to greenhouse the environment.

Knowing one of the limitations to the widespread use of this technology is the availability and uptake of useful solar radiation and its conversion into heat energy, and consequently, also in kinetic energy of the air; the investigation was based in the optimization in the use of solar energy available, replacing the horizontal collector with cylindrical and conventional chimney for a sloping triangular and convergent collector system with convergent chimney.

For current study was developed a numerical simulator of the main components that make up the system: solar collector and chimney.

A validation of the simulator was made using theoretical and experimental data reported in the literature, where a satisfactory result was performed. It also proposes a methodology for determination of the optimal tilt angle of the collector according to the projected location of the place.

Related to the conventional system, the results indicate that the proposed system, with the choice of the optimal tilt angle of the collector in location, modeling system can achieve an annual average increase of 6.8% in the uptake of radiation, increase monthly average solar radiation absorbed in 11.38%, and heat flow grows 49.75%. Also with the change in the geometry of the collector and the chimney, simulations indicate that it is possible to increase the flow rate of the collector up to 762%, the difference of total pressure generated and the difference of available pressure to be output by the turbine is 601%. Similarly, in the convergent chimney, conversion efficiency of thermal energy flow is gotten for the power available in 60%.

The proposed system is technically attractive and competitive as a sustainable alternative for electric generation, yet still presents challenges in matter of design and dimensions' optimization.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 2 |
| Abstract..... | 3 |
| Tabla de contenido..... | 4 |
| Lista de figuras..... | 6 |
| Lista de tablas | 9 |
| Agradecimientos | 10 |
| Reconocimientos..... | 11 |
| Capítulo 1: Introducción | 12 |
| 1.1 Problemática y justificación del proyecto | 12 |
| 1.2 Antecedentes | 16 |
| 1.3 Hipótesis..... | 18 |
| 1.4 Objetivos | 19 |
| General | 19 |
| Específicos | 19 |
| 1.5 Organización de la tesis | 19 |
| Capítulo 2: Radiación y Geometría solar | 21 |
| 2.1 Radiación Solar | 21 |
| 2.1.1 El Sol..... | 21 |
| 2.1.2 Espectro de la radiación solar..... | 22 |
| 2.1.3 Efectos atmosféricos | 23 |
| 2.1.4 Componentes de la radiación solar..... | 26 |
| 2.2 Geometría Solar | 27 |
| 2.2.1 Sistema Sol - Tierra..... | 27 |
| 2.2.2 Geometría solar | 30 |
| 2.2.3 Ángulos solares | 33 |
| 2.2.4 Constante solar | 35 |
| Capítulo 3: Centrales solares de chimenea | 36 |
| 3.1 Nomenclatura | 36 |
| 3.2 Introducción | 39 |
| 3.3 Modelo matemático central solar de chimenea convencional..... | 40 |
| 3.3.1 Procedimiento de solución | 45 |
| 3.3.2 Validación del modelo con datos experimentales | 46 |
| 3.4 Centrales solares de chimenea de colector inclinado (propuesto)..... | 47 |
| 3.4.1 Descripción del sistema..... | 48 |

| | |
|--|----|
| 3.4.2 Modelo Matemático y código..... | 48 |
| 3.4.3 Modelo de la radiación solar | 49 |
| 3.4.4 Transmisión a través del colector..... | 51 |
| 3.4.5 Chimenea cilíndrica (convencional)..... | 57 |
| 3.4.6 Eficiencia global térmica y de energía | 58 |
| 3.4.7 Algoritmo de solución para el modelado matemático del colector inclinado y chimenea cilíndrica..... | 59 |
| 3.4.8 Código y validación | 60 |
| 3.5 Chimenea convergente (propuesta)..... | 60 |
| 3.5.1 Ecuaciones que rigen el flujo | 60 |
| 3.5.2 Análisis de la chimenea..... | 63 |
| Capítulo 4: Resultados y Conclusiones..... | 64 |
| 4.1 Resultados | 64 |
| 4.2 Conclusiones | 77 |
| 4.3 Trabajos futuros | 80 |
| Referencias..... | 83 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1-1 Principio de funcionamiento de una chimenea solar..... | 14 |
| Figura 1-2 Ángulos solares de incidencia sobre superficies planas..... | 15 |
| Figura 1-3 Artículo de Isidoro Cabanyes..... | 16 |
| Figura 1-4 Vista aérea de la central eólico-solar de Manzanares..... | 17 |
| Figura 2-1 La fuente de energía en el centro del Sol proviene de las reacciones de fusión nuclear de átomos de hidrógeno para formar átomos de helio..... | 22 |
| Figura 2-2 Espectro de la radiación solar en escala logarítmica..... | 23 |
| Figura 2-3 Esquema de la altura de atmósfera homogénea y masa óptica del aire..... | 24 |
| Figura 2-4 Penetración de la radiación Solar en la Atmósfera. La curva indica el nivel al cual la intensidad disminuye en un factor de e-1..... | 25 |
| Figura 2-5 Efectos de las principales bandas de absorción de la atmósfera sobre la radiación solar..... | 25 |
| Figura 2-6 Radiación directa y difusa sobre un captador..... | 26 |
| Figura 2-7 Movimientos de la Tierra respecto al Sol..... | 27 |
| Figura 2-8 Rotación de la Tierra..... | 28 |
| Figura 2-9 Nutación de la Tierra..... | 29 |
| Figura 2-10 Declinación de la Tierra..... | 29 |
| Figura 2-11 Trayectoria aparente del Sol..... | 30 |
| Figura 2-12 Posición de la Tierra sobre su órbita durante los solsticios y equinoccios..... | 31 |
| Figura 2-13 Duración del día y la noche en los solsticios..... | 31 |
| Figura 2-14 Paralelos y meridianos geográficos sobre la Tierra..... | 32 |
| Figura 2-15 Trayectorias solares en el cielo para un observador en el ecuador..... | 33 |
| Figura 2-16 Trayectorias solares en el cielo para un observador sobre la línea del trópico de Cáncer..... | 33 |
| Figura 2-17 Representación tridimensional de los ángulos solares en la bóveda terrestre.. | 34 |
| Figura 2-18 Grafico de la variación de la constante solar con datos diarios..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 3-1 Componentes principales de una central solar de chimenea convencional..... | 39 |
| Figura 3-2 Componentes principales de la central solar de chimenea propuesta..... | 40 |
| Figura 3-3 Diseño esquemático de una central solar de chimenea convencional | 42 |
| Figura 3-4 Vista de la sección de colector inclinado | 48 |
| Figura 3-5 Trayectoria de la radiación en el colector | 52 |
| Figura 3-6 Ángulos de incidencia y refracción del haz al cruce de un medio con índice de refracción n_1 a un medio con índice de refracción n_2 | 53 |
| Figura 3-7 Esquema del sistema de colector con los parámetros correspondientes empleados..... | 55 |
| Figura 3-8 Vista de la sección de la chimenea convergente | 61 |
| Figura 3-9 Configuraciones simuladas de la chimenea..... | 63 |
| Figura 4-1 Radiación total promedio mensual sobre superficie inclinada en Morelia..... | 65 |
| Figura 4-2 Radiación total promedio anual sobre superficie inclinada en Morelia | 66 |
| Figura 4-3 Ángulo de incidencia de la radiación difusa y reflejada del suelo variando ángulo de inclinación de la superficie | 67 |
| Figura 4-4 Promedio mensual del ángulo de incidencia de la radiación directa variando ángulo de inclinación de la superficie | 68 |
| Figura 4-5 Promedio anual del ángulo de incidencia de la radiación directa variando ángulo de inclinación de la superficie | 69 |
| Figura 4-6 Radiación total absorbida por el colector promedio mensual variando ángulo de inclinación del colector..... | 70 |
| Figura 4-7 Radiación total absorbida por el colector promedio anual variando ángulo de inclinación del colector | 71 |
| Figura 4-8 Mallado para análisis finito sistema de chimenea convencional..... | 73 |
| Figura 4-9 Mallado para análisis finito sistema de chimenea propuesto | 73 |
| Figura 4-10 Perfil de temperaturas sistema de chimenea convencional | 74 |
| Figura 4-11 Perfil de temperaturas sistema de chimenea propuesto..... | 74 |
| Figura 4-12 Perfil de presiones sistema de chimenea convencional..... | 74 |
| Figura 4-13 Perfil de presiones sistema de chimenea propuesto | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-14 Perfil de velocidades sistema de chimenea convencional | 75 |
| Figura 4-15 Perfil de velocidades sistema de chimenea propuesto..... | 76 |
| Figura 4-16 Perfil de velocidad en la sección de conexión colector – chimenea en sistema propuesto | 81 |
| Figura 4-17 Perfil de presiones en la sección de conexión colector – chimenea en sistema propuesto | 82 |
| Figura 4-18 Perfil de velocidades en sistema propuesto..... | 82 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2-1 Clasificación de la radiación de acuerdo con su longitud de onda y su contribución al espectro de energías del sol fuera de la atmósfera | 23 |
| Tabla 3-1 Dimensiones geométricas de la planta piloto en Manzanares, España..... | 46 |
| Tabla 3-2 Comparación entre los datos medidos en la planta piloto de Manzanares (Haaf W. , 1984) y los resultados teóricos del presente trabajo..... | 46 |
| Tabla 3-3 Datos de la planta piloto de Manzanares (Weinrebe G, 2001) | 47 |
| Tabla 3-4 Comparación entre los datos medidos de la planta piloto de Manzanares (Weinrebe G, 2001) y los resultados teóricos del presente trabajo (datos del 1 de septiembre de 1989)..... | 47 |
| Tabla 3-4 Promedio mensual diario de radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal (MJ/m^2) (Kalogirou, Solar energy engineering : processes and systems, 2009) | 50 |
| Tabla 4-1 Dimensionamiento de los sistemas para el modelado | 64 |
| Tabla 4-2 Cálculo de la radiación total incidente sobre una superficie inclinada (MJ/m^2 día) | 65 |
| Tabla 4-3 Promedio mensual del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie inclinada variando el ángulo de inclinación, grados..... | 68 |
| Tabla 4-4 Promedio mensual de la radiación total absorbida por el colector variando el ángulo de inclinación, (MJ/m^2 día)..... | 70 |
| Tabla 4-5 Resultados del modelo matemático del sistema convencional con los datos geográficos y meteorológicos de Morelia, Michoacán | 72 |
| Tabla 4-6 Datos meteorológicos de la ciudad de Morelia, Michoacán..... | 76 |
| Tabla 4-7 Resultados obtenidos de los principales parámetros del sistema convencional y el sistema propuesto ubicados en Morelia, Michoacán..... | 77 |

Agradecimientos

A Dios

Por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a todas aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante toda mi vida.

A mis Padres:

Flavio y Josefina por todo el apoyo, cariño y amor que me han brindado para la culminación de ésta y todas las etapas de mi vida, siempre les estaré agradecido.

A mi Esposa y a mi hijo:

Eugenia y Samuel con quien comparto todos los días el valor de vivir con amor, gracias por su infinita paciencia, por su invaluable compañía e inagotable apoyo. Gracias por compartir mi vida y mis logros, esta tesis también es suya, los amo.

A mis hermanos:

Montserrat, Sofía, Fátima y Flavio por ser parte importante en mi existencia y brindarme su apoyo siempre. Por los momentos buenos y malos que pasamos. Me siento orgulloso de tenerlos como hermanos.

A mi familia:

Abuelos, Padres, Tíos, Hermanos, Cuñados, Sobrinos, Primos, por ser una gran familia y por haberme enseñado los valores de una familia unida y enseñarme que cuando uno triunfa es por ese respaldo que dan, y cuando uno fracasa, nos ayudan a superar los problemas y nos levantan para seguir adelante.

Una mención especial a un ser que aprecio mucho: Rubén Heredia Bucio † gracias Abuelito por el Legado que nos dejó, lo extraño.

A mis amigos:

A todos mis amigos que he tenido a lo largo de mi vida que son muchos y que son parte de lo que ahora soy, también a todas las personas que conocí a lo largo de mi vida que contribuyeron de cualquier manera a ser lo que ahora soy.

Reconocimientos

A la Universidad Tecnológica de Morelia por las facilidades y apoyos recibidos y por permitirme compartir sus aulas con los alumnos: mis alumnos, a quienes les agradezco todo lo que aprendo de ellos en cada cátedra.

A la Universidad Tecnológica de San Juan del Río (UTSJR) por aceptarme en la sede, por las finas atenciones que tuvieron para conmigo, haciéndome sentir en casa, Gracias.

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) por haberme aceptado en el programa y abierto las puertas a su seno científico para poder estudiar ésta Maestría, así como también a los diferentes Docentes que brindaron sus conocimientos y apoyo para seguir adelante día a día.

Al Dr. Ricardo Beltrán Chacón (CIMAV), mi Director de tesis, y al Dr. Ángel Marroquín de Jesús (UTSJR), mi asesor de tesis, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Juan Manuel Olivares Ramírez y al Ing. Aldo Jaime Pureco Niño por su contribución a este proyecto.

Capítulo 1: Introducción

La energía eléctrica es sin precedentes, uno de los recursos indispensables para el progreso y desarrollo de la humanidad. Más aún, es indispensable para la vida cotidiana actual.

El crecimiento indiscriminado en el consumo de energéticos a nivel mundial, y la consecuente emisión de contaminantes a nuestro entorno contribuyendo al calentamiento global, aunado a la grave escasez de combustibles fósiles cada vez más caros, hacen inminente el uso de otras fuentes de energía limpias y renovables.

La energía solar es una de las mejores alternativas para su utilización en la generación de energía eléctrica y térmica. La tierra recibe 1.7×10^{14} kW de los 3.8×10^{20} MW emitidos por el sol, y se estima que 84 minutos de exposición en la tierra a ésta radiación equivale a la demanda energética mundial durante un año (Kalogirou, 2009).

1.1 Problemática y justificación del proyecto

En términos generales, podría decirse que toda la energía que recibe la tierra procede del sol, de la cual un pequeño porcentaje es utilizado para mantener el hábitat necesario para los seres vivos, sin embargo, la mayor parte se disipa al exterior. Por otro lado, el calentamiento desigual en la tierra, debido a la gran dinámica entre el sol y la tierra, y de ellos mismos de manera individual, como la rotación y traslación, provocan variaciones diarias a lo largo de todo el año generando los fenómenos meteorológicos (vientos, lluvias, nevadas, etc.), que a su vez provocan la formación de corrientes y almacenamientos de agua (ríos, lagos, mares, etc.). Por esto, podríamos decir que casi todas las energías utilizables en nuestro planeta, provienen de una fuente única: el sol, razón que hace atractiva a la energía solar.

Derivado de los avances tecnológicos desde la primera revolución industrial, que inicia en Inglaterra en 1776, las necesidades energéticas se han incrementado de manera alarmante, esto ha obligado a buscar fuentes de energía sustentable, capaz de satisfacer la creciente demanda y el nivel de bienestar. En un inicio, el incremento en el consumo energético se basó en la minería del carbón, posteriormente, en combustibles derivados del petróleo, del gas natural y finalmente de la energía nuclear.

Actualmente, la estructura energética mundial, en gran parte, basa su consumo en las energías fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y nuclear, apartando la energía hidráulica. Los resultados de ésta práctica actual de consumo energético conducen a la

emisión de gases de efecto invernadero, la generación de residuos sólidos y líquidos, el riesgo de accidentes graves y el agotamiento paulatino de los yacimientos existentes.

Es inevitable pensar en una situación caótica e insostenible en un futuro próximo, por lo que es preciso recurrir a fuentes de energía renovables y limpias, sin efectos irreparables en nuestro entorno, desarrollar tecnología eficiente e instrumentos políticos y sociales que favorezcan su viabilidad económica.

El aprovechamiento de la energía solar contribuye a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, así como al ahorro en las reservas de energías no renovables, fundamentales en algunos sectores.

Dentro de la gama de equipos que aprovechan la energía solar existen variados tipos, sin embargo, básicamente se clasifican en dos grandes categorías: sistemas fototérmicos y sistemas fotovoltaicos. La primera categoría, a su vez, se subdivide en diferentes subgrupos, de acuerdo a su forma de trabajo, temperatura de trabajo y fluido utilizado para transportar el calor captado por los elementos captadores:

- *Sistemas fototérmicos pasivos*. Son aquellos donde se aprovechan los efectos térmicos de la radiación solar y que, para el aprovechamiento, no se requiere el aporte de cualquier otro tipo de energía, o bien, su consumo es totalmente despreciable
- *Sistemas fototérmicos activos*. Son semejantes a los anteriores pero con la diferencia que se requiere el aporte de energía auxiliar como, por ejemplo, la energía eléctrica consumida por bombas o ventiladores destinados a mover los líquidos o gases encargados de transportar el calor desde el captador solar hasta el punto de consumo. Dentro de esta categoría, suelen establecerse distintos subgrupos en función del fluido de trabajo (aire, agua, aceite térmico o sales fundidas) y en función del nivel térmico.

Una alternativa de solución a la problemática de satisfacer la creciente demanda energética mundial, y particularmente la energía eléctrica, disminuyendo la producción de efectos secundarios dañinos a nuestro entorno es el uso de centrales termoeléctricas solares de chimenea, que pertenecen a la categoría de sistemas fototérmicos pasivos.

A las chimeneas solares se les define como: “*centrales solares termoeléctricas de bajas temperaturas*”, que usan el aire de la atmósfera como fluido de trabajo, donde se utiliza sólo una parte del ciclo termodinámico dentro de la central (Ninic, 2006).

En la chimenea solar la radiación del sol calienta el aire que se encuentra debajo de una gran cubierta traslúcida abierta en su contorno y con una ligera pendiente elevándose hacia el centro (Castell, 2012). Ésta cubierta y el terreno forman un gran colector que calienta el aire. En el centro de la cubierta se sitúa una gran chimenea con amplias entradas de aire en su base. La junta entre la cubierta y la chimenea es estanca,

de tal forma que el aire caliente, que es más ligero que el frío, asciende por la chimenea (up saft). La baja presión provoca que el aire caliente bajo la cubierta transparente siga entrando a la chimenea, y el aire frío exterior sea aspirado (efecto termosifón) por el perímetro descubierto del colector entre la cubierta traslúcida y el terreno.

La energía contenida en el flujo del aire se transforma en energía mecánica mediante una o varias turbinas colocadas en la chimenea, y en energía eléctrica mediante generadores propulsados por las turbinas, como se muestra en la figura 1-1.

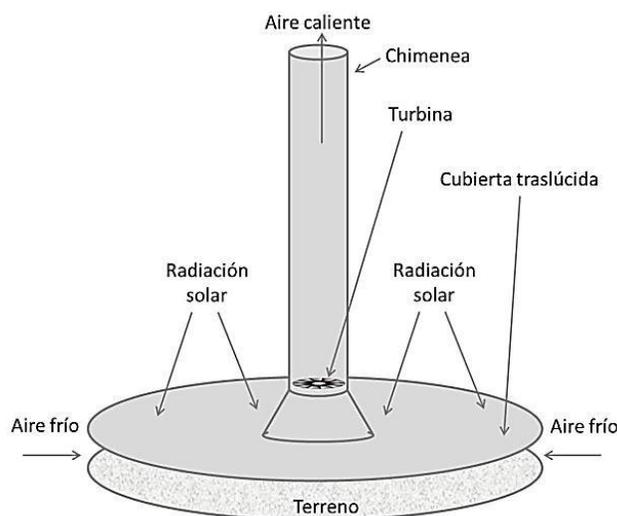


Figura 1-1 Principio de funcionamiento de una chimenea solar.

Desde hace algunos años se ha venido realizando investigación referente al tema de centrales de energía solar de chimenea. En la investigación referente a colectores solares planos, define claramente que la eficiencia de un sistema de captación solar está íntimamente ligado al ángulo de captación de radiación, es decir, la necesidad que la radiación sea captada de forma perpendicular a la superficie (figura 1-2), está demostrado que es la forma más eficiente, evitando pérdidas ópticas, siendo éste uno de los aspectos que hasta ahora ha sido poco estudiado en el tema de sistemas de chimenea solar (Kalogirou, 2009).

Los avances de la tecnología nos ofrecen ahora paquetes computacionales que de manera casi instantánea y bastante confiable, nos determinan el ángulo de inclinación adecuado para el colector en el cual se presenta la mayor captación de la radiación disponible.

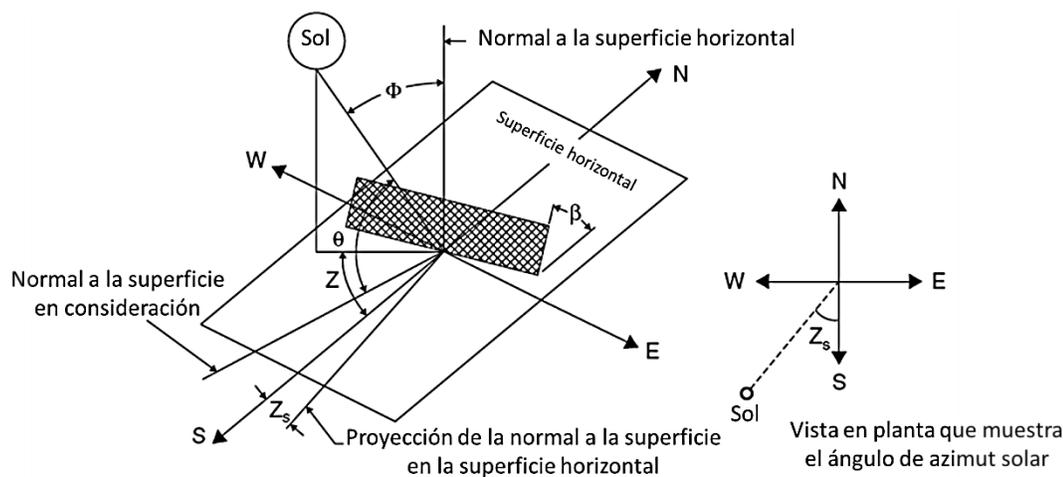


Figura 1-2 Ángulos solares de incidencia sobre superficies planas.

La determinación del ángulo de captación y orientación adecuadas a la Latitud, Longitud y altura sobre del nivel del mar (A.S.N.M) del emplazamiento, así como la inclinación adecuada contribuye sustancialmente a la eficiencia del sistema, ayudando obviamente, a incrementar la captación de radiación, lo que influye directamente en el incremento del diferencial de temperatura entre el aire calentado en el colector y el aire ambiente.

La aplicación del cambio de sección transversal en la chimenea para acelerar el flujo, ayudan a incrementar el diferencial de velocidad del fluido dentro de ésta, influyendo en el efecto termosifón y en la eficiencia del sistema.

El interés en realizar ésta investigación surge de dos aplicaciones independientes, que en los sistemas de chimenea solar se conjugan. En el caso que se tenga la necesidad de captar radiación en una superficie plana, ya sea una celda fotovoltaica, un calentador solar de agua ó aire, ó un deshidratador solar, y no sea factible instalar un sistema seguidor solar, la orientación e inclinación en que se coloque la superficie es fundamental para el aprovechamiento al máximo de la energía disponible, y por consiguiente, de la potencia final del sistema que se trate. Por otro lado, en el aprovechamiento de la energía eólica, específicamente en los aerogeneradores de palas o de alabes de perfil aerodinámico, la potencia resultante de la conversión de la energía de fluido disponible en el viento y el motor eólico del aerogenerador depende de la velocidad del viento elevada a la tercera potencia (v^3), es decir, que al duplicarse la velocidad del viento, la potencia se incrementa ocho veces.

Considerando la propuesta de modificación en el ángulo de inclinación y geometría en el colector, y la variación en la sección transversal de la chimenea, se

pretende en éste estudio evaluar la factibilidad técnica con los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo propuesto y el modelo convencional.

1.2 Antecedentes

El 25 de Agosto de 1903, la revista *La Energía Eléctrica*, subtitulada Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones, publicaba un artículo del coronel de artillería Isidoro Cabanyes, titulado “*Proyecto de motor solar*”, figura 1-3.

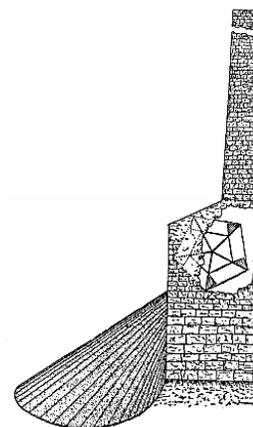


Figura 1-3 Artículo de Isidoro Cabanyes

Después de describir como poco útiles las máquinas solares anteriores a él, proponía un nuevo ingenio constituido por una chimenea con dos peculiaridades en su base:

- La primera, un colector solar destinado a calentar el aire, y provocar así una corriente ascensional por la chimenea.
- La segunda, un generador eólico destinado a producir trabajo mecánico a impulso de esa corriente ascensional.

El artículo incluía los detalles constructivos del motor propuesto, anunciaba sus pretendidas y múltiples ventajas, propugnaba su uso para cargar baterías, y proponía un conjunto de fórmulas para calcular el trabajo que podía esperarse de tal motor.

Sin embargo, en 1981, es decir, casi 80 años después de la publicación del mismo, y ya en los inicios del actual resurgimiento de la energía solar, el Ministerio Alemán de Investigación y Tecnología (BMFT), con la colaboración de la eléctrica española Unión Fenosa, promovió y financió la construcción de una máquina basada en el mismo principio en la localidad manchega de Manzanares (figura 1-4). Ciertamente aparatosa, la chimenea tenía 195 m de altura, era entonces, la estructura metálica más alta de España, 10 m de diámetro y un peso de 200 toneladas (muy poco si se considera su tamaño). El colector solar era un enorme invernadero de plástico, de forma aproximadamente redonda, de 240 m de diámetro, constituido a base de cuadrados de unos 6 m de lado. En los nodos de la red resultante existían unas columnas que sostenían el plástico, a unos 2 m de elevación sobre el suelo. Una persona podía caminar tranquilamente por encima del plástico, lo que da buena idea de la robustez del invernadero. En la base de la chimenea se instaló un generador eólico de 50 kW de potencia (Xinping Zhou, 2009).



Figura 1-4 Vista aérea de la central eólico-solar de Manzanares

Los Alemanes presentaron la propuesta de una central eólico-solar real (la que construyeron en Manzanares se presentaba como un simple modelo para experimentación), con una potencia de 200 MW, incluía una chimenea de ¡1000 m de altura y 170 m de diámetro! (Lorenzo, 2002); y atribuían múltiples ventajas a sus futuros ingenios, incluida la de poder arreglar los problemas de los países pobres y del mundo en su globalidad.

En el año 2009, Salah Larbi, Amor Bouhdjar y Toufik Chergui analizaron el rendimiento de una central de energía solar de chimenea, y esperan que proporcione energía eléctrica a los pueblos remotos situados en la región suroeste de Argelia. Concluyen que: “Durante condiciones climáticas dadas, la energía producida se incrementa con el aumento de la altura de la torre y la superficie del colector. Esta producción está más influenciada por la radiación solar que por la temperatura ambiente, y que la central de energía propuesta puede producir de 140 a 200 kW de energía eléctrica en un sitio como el de Adrar, y que dura todo el año, según una estimación

hecha en el promedio mensual de radiación. Esta producción es suficiente para satisfacer las necesidades de las zonas aisladas, y el colector solar del dispositivo podrían también ser utilizado como un invernadero para usos agrícolas” (Salah Larbi, 2010).

En el año 2012, Nadia Saifia, et al realizaron una investigación detallada de la simulación matemática y experimental del flujo de aire en chimeneas solares. Mostrando experimentalmente que la velocidad en la chimenea está influenciada por “la anchura del canal y también por el ángulo de inclinación de la chimenea”. Llevaron a cabo investigaciones para encontrar “el efecto de la inclinación en el rendimiento de chimenea solar en Ouargla Provincia, Argelia”. El estudio experimental y numérico lo llevaron a cabo para una chimenea solar inclinada a dos pendientes: 30° y 45° , además, el espesor de aire situadas entre el absorbedor y el panel de 10 cm, 20 cm y 30 cm, llevándolos a las siguientes conclusiones: “La variación en la temperatura entre el absorbedor y el panel varía en función del flujo solar incidente, el diseño adoptado permite obtener el flujo de aire bastante alto en la salida de la chimenea, lo que es interesante para explotarlos en la ventilación natural, la simulación numérica permite determinar curvas de temperatura y el perfil de la velocidad en el interior de la chimenea solar para diversas inclinaciones, la tracción térmica óptima se alcanza con un ángulo de inclinación de 45° ” (Nadia Saifia, 2012).

Como se ha mencionado en las investigaciones anteriores, es evidente que a mayor radiación solar captada, se obtiene mayor potencia en el sistema; y que el ángulo de inclinación en el colector influye sustancialmente en la captación de radiación. Es por esto que en el presente trabajo se propone realizar las modificaciones en el modelo convencional de chimenea solar, a fin de evaluar la influencia de éstas en el funcionamiento del sistema.

1.3 Hipótesis

Una central de chimenea solar con la orientación e inclinación adecuadas, cambio de geometría en el colector y utilizando un cambio de sección transversal en la chimenea para la aceleración del flujo puede ser una alternativa más atractiva en términos de eficiencia y capacidad por unidad de área del colector en comparación con las plantas convencionales para la generación de energía eléctrica con energía solar.

1.4 Objetivos

General

Realizar la simulación, evaluación y diseño de una planta de chimenea solar, con características que permitan maximizar el aprovechamiento de la energía solar, mediante la determinación del ángulo de inclinación y cambio de geometría del colector, y el cambio de sección transversal del diámetro de la chimenea.

Específicos

1. Analizar la configuración de las centrales solares de chimenea, seleccionar la más adecuada y recabar la información e investigación de su operación y eficiencia.
2. Desarrollar un simulador numérico como herramienta de simulación y optimización de este tipo de sistemas.
3. Validar el simulador numérico con resultados reportados en la literatura.
4. Determinar mediante un simulador numérico el ángulo de inclinación y la orientación adecuada al sitio del emplazamiento de la central solar de chimenea elegida.
5. Realizar la comparación de resultados de las simulaciones y evaluarlas.

1.5 Organización de la tesis

La secuencia del contenido de esta tesis representa en buena manera la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo, la cual se describe brevemente a continuación.

El capítulo 2 presenta los fundamentos para la mejor comprensión y abordaje del estudio. Al tratarse la investigación de un sistema que obtiene su energía del Sol, se describe, en primera instancia, la naturaleza de la energía solar, los efectos que produce la atmósfera en la trayectoria de la radiación solar y finalmente los tipos de radiación sobre la superficie terrestre. A continuación, se explica la dinámica que existe entre el Sol y la

Tierra, la influencia que esto tiene en la captación de energía y la manera de determinar la energía captada de acuerdo a la posición que guarda la superficie captadora.

En el capítulo 3 se describe el principio de funcionamiento de una central solar de chimenea convencional y el de la central solar de chimenea propuesto, las modificaciones propuestas, el modelo matemático de cada uno de los principales componentes del sistema: el sistema colector (cubierta traslúcida) y la chimenea. Se describen las principales funciones con las que cuentan los simuladores desarrollados, además de la validación de los modelos, los cuales fueron realizados utilizando resultados teóricos y experimentales de diversos sistemas reportados en la literatura. Este capítulo también incluye un modelo matemático para la determinación del ángulo óptimo de inclinación y de incidencia, de la energía incidente y la absorbida por el colector en función de dichos ángulos, así como los efectos en el flujo másico del fluido de trabajo (aire) al variar la geometría del colector y la sección transversal de la chimenea.

El capítulo 4 contiene los resultados obtenidos de simulación, así como la propuesta de trabajos futuros. El modelado matemático del sistema solar de chimenea convencional muestra el comportamiento de éste sometido a las condiciones meteorológicas y geográficas de la ciudad de Morelia, Michoacán. También incluye los resultados obtenidos de las simulaciones mediante la técnica de elemento finito del sistema propuesto bajo las mismas condiciones.

Capítulo 2: Radiación y Geometría solar

En éste capítulo se trata el análisis de las modificaciones propuestas al sistema convencional de chimenea solar. Como ya se mencionó, con la determinación del ángulo de captación y orientación adecuadas a la Latitud, Longitud y altura sobre del nivel del mar (A.S.N.M) del emplazamiento, así como la inclinación adecuada que pretende incrementar la captación de radiación en el colector, para generar un incremento del diferencial de temperatura entre el aire calentado en el colector y el aire ambiente.

2.1 Radiación Solar

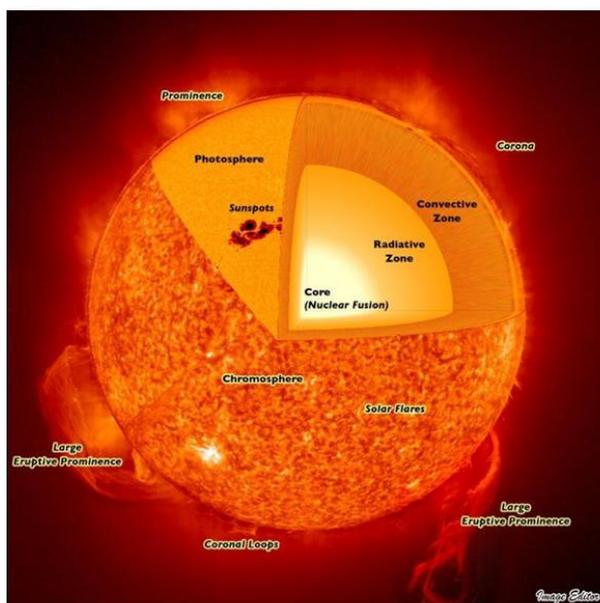
Prácticamente toda la energía que llega a la tierra procede del sol. Una pequeñísima parte de ella se utiliza para mantener la vida orgánica en la biósfera y el resto, dejando aparte la acumulación debida al calentamiento global, se disipa al exterior.

Por otro lado, la diferencia de radiación solar entre las distintas zonas de la tierra a lo largo del año y la variación diaria para una zona determinada provocan los fenómenos meteorológicos (vientos, lluvias, nevadas, etc.) y éstos, la formación de corrientes y almacenes de agua (lagos, ríos, mares, etc.) O sea que la mayor parte de las energías utilizables, provienen de una fuente única: *el Sol*.

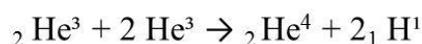
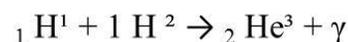
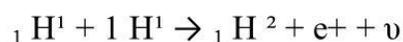
2.1.1 El Sol

Entre la diversidad de tipos de estrellas, el Sol corresponde a las más comunes en el Universo. Es una estrella amarilla mediana, se estima que han transcurrido 4,500 millones de años desde su formación y que se encuentra aproximadamente a la mitad de su vida media. Está compuesta principalmente de hidrógeno (80%) y helio (18%) y trazas de otros elementos. El radio mayor de la fotosfera (superficie visible del Sol) es de aproximadamente de 6.9×10^8 m, (casi 109 veces el radio de la Tierra) y tiene una masa de alrededor de 20,000 trillones de kilogramos (1.987×10^{30} kg). Esta enorme cantidad de masa unida gravitacionalmente permite alcanzar en su núcleo presiones superiores a 100,000 millones de atmósferas y temperaturas superiores a los diez millones de grados centígrados. Bajo estas condiciones ocurren las reacciones de fusión nuclear, de manera general ésta consiste en la unión de 4 núcleos de átomos de hidrógeno para formar un núcleo de átomo de helio. El núcleo de átomo de Helio tiene una masa atómica de 4.002602 uma (unidad de masa atómica) mientras que 4 átomos de hidrogeno representan una masa atómica de 4.003176 uma. Esta diferencia de masa, representa la fuente de

energía del Sol, las múltiples reacciones de fusión transforman una pequeña fracción de la masa del Sol en una gran cantidad de energía radiante y energía interna (figura 2-1). A pesar de la enorme cantidad de energía liberada al espacio de forma continua, se calcula que para agotar el 1% del hidrógeno del sol se necesitarían 10 mil millones de años. Por esta razón podemos considerar al Sol como una fuente de energía inagotable, (Riveros Rosas, 2011).



Ciclo de fusión de Hidrógeno (Charles Critchfield)



donde:

e^+ = positrón

γ = rayo gama

Figura 2-1 La fuente de energía en el centro del Sol proviene de las reacciones de fusión nuclear de átomos de hidrógeno para formar átomos de helio.

2.1.2 Espectro de la radiación solar

La radiación que se genera en el interior del Sol, está compuesta básicamente por radiación gamma y rayos X. Sin embargo, no es esta la radiación que se emite desde el Sol al espacio exterior. Debido a la interacción entre la radiación y la materia, las capas que rodean al núcleo, absorben y reemiten continuamente la radiación, a lo largo del radio solar, toda la radiación proveniente desde el interior. Finalmente la energía que se libera desde la fotosfera es un continuo de frecuencias en las que predomina la radiación visible e infrarroja (tabla 2.1). La energía radiada por el Sol al espacio se conoce comúnmente como **radiación solar**. La forma en que se distribuye la radiación solar a diferentes longitudes de onda se le conoce como **distribución espectral**. En la figura 2.2 se presenta un ejemplo de la distribución espectral fuera de la atmósfera terrestre, en la cual podemos observar el máximo de intensidad a una longitud de onda de 460 nm.

Tabla 2-1 Clasificación de la radiación de acuerdo con su longitud de onda y su contribución al espectro de energías del sol fuera de la atmósfera

| Long. de Onda | Tipo de Radiación | % del Espectro |
|-----------------------|------------------------|----------------|
| < 1 nm | Rayos X y rayos gama | |
| 1 nm – 200 nm | Ultravioleta lejano | < 0.02 % |
| 200 nm -315 nm | Ultravioleta medio | 2.0 % |
| 315 nm – 380 nm | Ultravioleta cercano | 5.3 % |
| 380 nm – 720 nm | Visible | 43.5 % |
| 720 nm – 1.5 μ | Infrarrojo cercano | 36.8 % |
| 1.5 μ - 5.6 μ | Infrarrojo medio | 12.1 % |
| 5.6 μ - 1 mm | Infrarrojo lejano | < 0.3 % |
| > 1 mm | Micro y ondas de radio | |

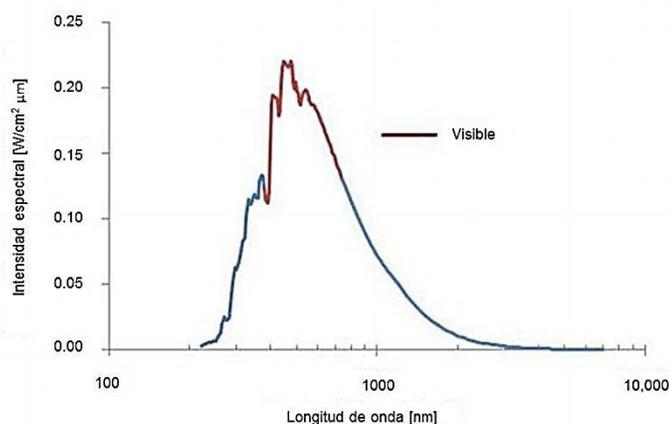


Figura 2-2 Espectro de la radiación solar en escala logarítmica

2.1.3 Efectos atmosféricos

La radiación solar que medimos desde la superficie de la Tierra, no es la misma que la recibida fuera de la atmósfera. Esta sufre una serie de cambios cuantitativos y cualitativos debido a su interacción con los gases y partículas que forman la atmósfera terrestre, y su “desgaste”, dependerá de los factores físicos que varían en forma local en cada región sobre la Tierra. Los componentes atmosféricos que afectan la radiación solar pueden enlistarse de la siguiente manera:

- Principales gases constituyentes de la atmósfera.
- Vapor de agua y otros gases.
- Ozono.

- Partículas suspendidas (aerosoles).

La altura de atmósfera homogénea es la altura que tendría la atmósfera si supusiéramos que la densidad del aire es constante de tal forma que la presión atmosférica es igual a la presión atmosférica real. La masa óptica representa la razón entre el cambio de intensidad a lo largo de cierto camino óptico y el cambio de intensidad a lo largo de la vertical. Por ejemplo, si el Sol estuviera directamente en el cenit, entonces la masa óptica equivalente es igual a la unidad. En cualquier otra posición, el camino óptico que recorre la radiación solar es mayor, por lo que la masa óptica fuera de la vertical siempre es mayor a la unidad (figura 2-3).

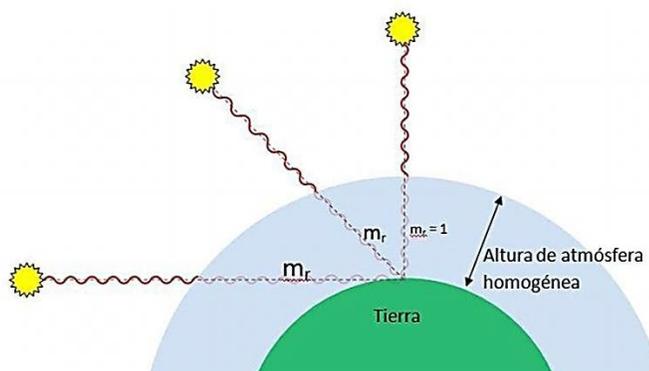


Figura 2-3 Esquema de la altura de atmósfera homogénea y masa óptica del aire

Otro fenómeno que se presenta en la atmósfera es la absorción, esta ocurre de manera selectiva en ciertas regiones del espectro y en ciertas bandas del espectro. Las regiones del espectro más afectadas son la ultravioleta e infrarrojo, pues las transiciones electrónicas de las moléculas de oxígeno, nitrógeno y ozono se presentan en la ultravioleta, mientras las moléculas de agua, bióxido de carbono y ozono presentan frecuencias naturales de vibración en la región infrarroja.

En el caso de la radiación ultravioleta, ésta se absorbe en la llamada capa de ionización entre los 90 km y 160 km, produciendo la ionización de moléculas de O_2 , N_2 y NO . De manera similar la capa superior de ozono se forma entre los 30 km y 60 km, por las reacciones fotoquímicas producidas por la interacción de la radiación ultravioleta con el oxígeno. En dichas reacciones se absorbe la radiación cuyas longitudes de onda se encuentran entre los 190 nm y 320 nm. La profundidad que penetra en la atmósfera la radiación ultravioleta en toda su gama de longitudes de onda se presenta en la figura 2-4.

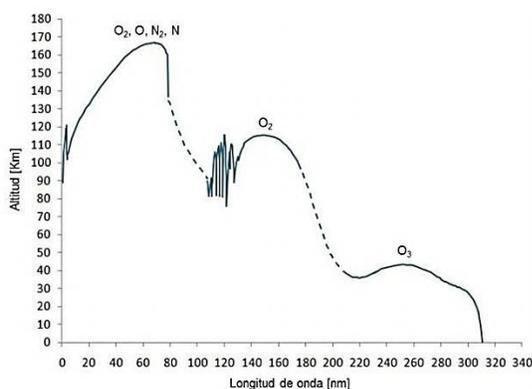


Figura 2-4 Penetración de la radiación Solar en la Atmósfera. La curva indica el nivel al cual la intensidad disminuye en un factor de $e-1$

La radiación visible en la atmósfera presenta poca absorción, la cual se presenta en una banda de ozono y en las bandas rojas del oxígeno molecular, alrededor de los 690 nm y 760 nm. Hacia el infrarrojo se presentan bandas debidas a la presencia de humedad en la atmósfera (H_2O) y en la región de onda larga el H_2O y el CO_2 absorben tanto la parte solar de esta radiación como la parte de la radiación que es emitida térmicamente por la atmósfera baja y por la superficie terrestre. La energía absorbida en la atmósfera baja es la que mantiene caliente nuestra atmósfera, evita cambios extremos de temperatura entre el día y la noche, y comúnmente se le conoce como *efecto de invernadero*.

El efecto global de las bandas de absorción descritas anteriormente y la dispersión de Rayleigh pueden observarse en la figura 2-5. La forma de esta gráfica puede variar significativamente dependiendo de la latitud, altitud, condiciones geográficas, clima, humedad y por la presencia de otros componentes atmosféricos.

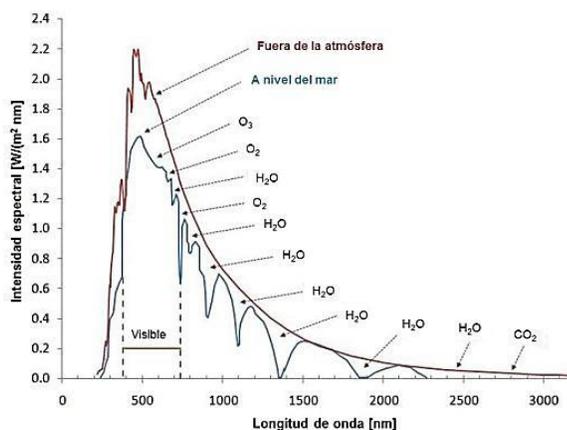


Figura 2-5 Efectos de las principales bandas de absorción de la atmósfera sobre la radiación solar

2.1.4 Componentes de la radiación solar

La radiación solar es emitida desde la fotosfera en todas direcciones, viaja en línea recta a velocidad de la luz y su intensidad disminuye de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco emisor. Debido a la propagación de la radiación solar en dirección constante fuera de la atmósfera, decimos que está compuesta de rayos que viajan directamente del foco emisor hasta una superficie receptora. A la radiación solar que recibimos directamente desde el disco solar se le da el nombre de **radiación directa**. Como ya se mencionó, cuando los rayos solares entran en la atmósfera interactúan con sus diversos componentes como son, el aire, el ozono, las moléculas de agua, polvo, etc. Los fenómenos de absorción, dispersión, refracción y reflexión, distribuyen parte de la radiación directa del Sol a toda la extensión del cielo. En consecuencia, un captador recibe en su superficie radiación solar de dos tipos: **directa** y **difusa**. La directa, ya ha sido definida como aquella radiación que llega al captador sin sufrir algún cambio de dirección en su trayectoria, desde la superficie del Sol hacia éste. La **difusa**, es la radiación que recibe el captador proveniente de la bóveda celeste excepto del disco solar. La **radiación difusa** se compone principalmente de radiación solar que ha sido dispersada, refractada y reflejada. En la Fig. 2-6 se muestra un esquema representativo de dichas radiaciones.

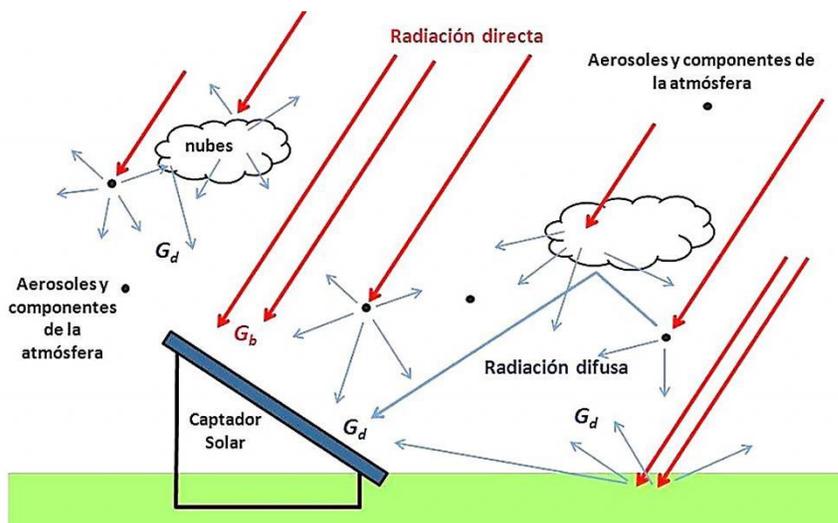


Figura 2-6 Radiación directa y difusa sobre un captador

A la suma de las radiaciones directa y difusa se le conoce con el nombre de **radiación global**. Sin embargo la irradiancia directa debe multiplicarse por el coseno del ángulo cenital (θ_C) para calcular la irradiancia efectiva sobre el captador al incidir de manera oblicua sobre éste (figura 2-6), por lo tanto, si G_b es la **irradiancia directa**, G_d es la **irradiancia difusa** y G_g es la **irradiancia global solar**. Luego, la **irradiancia global sobre un captador** estará dada por:

$$G_g = G_b \cos(\theta_c) + G_d \quad (2.1)$$

Al considerar la atenuación de la radiación solar al pasar a través de la atmósfera, se ha establecido que a nivel del mar, durante un día claro y sin partículas suspendidas, estando el Sol próximo al cenit, la máxima irradiancia directa que se puede recibir en el captador es ligeramente menor de 1000 W/m^2 . Desde un punto de vista operacional, los ingenieros dedicados a la aplicación de la energía solar han tomado como convención que, bajo las condiciones anteriores, el valor para la máxima irradiancia directa que puede recibir un captador sea de **1000 W/m^2** . A éste valor se le conoce como ***el pico de la radiación solar***. A medida que se aumenta en altura sobre el nivel del mar, el espesor de la masa de aire disminuye, se reducen los efectos de atenuación y en consecuencia, la irradiancia directa sobre el captador tendrá valores ligeramente superiores al pico. En la práctica rara vez se miden valores de radiación directa superiores a 1050 W/m^2 . Fuera de la atmósfera, el valor máximo de la irradiancia directa es el de la constante solar.

2.2 Geometría Solar

Si intentamos aprovechar la energía solar, de la mejor manera posible, debemos conocer bien algunas de sus características más importantes, tales como: horas de sol para una situación geográfica determinada, trayectoria aparente del sol respecto a un punto situado sobre la superficie de la Tierra, cantidad de energía recibida en un metro cuadrado en un tiempo determinado, energía recibida a lo largo de un día, mes, año, etc (Jutglar, 2004).

2.2.1 Sistema Sol - Tierra

El movimiento de la Tierra respecto del Sol puede descomponerse en tres movimientos elementales: traslación, rotación y nutación, figura 2-7.

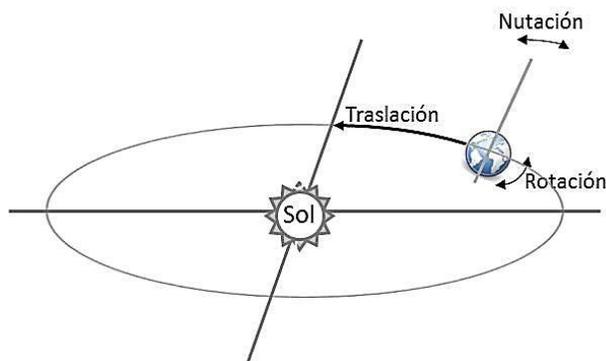


Figura 2-7 Movimientos de la Tierra respecto al Sol.

Traslación. La Tierra se traslada alrededor del Sol siguiendo aproximadamente una trayectoria elíptica de pequeña excentricidad, cuya duración es de 365 días, 6 horas y 9.1626 minutos para una vuelta. La órbita tiene un perímetro de 930 millones de kilómetros, la Tierra se desplaza en el espacio exterior a una velocidad de 108,000 km/hr, ó 30 km/s, en el plano de la eclíptica, figura 2-7.

Rotación. Además del movimiento de traslación, la Tierra gira sobre sí misma, alrededor de un eje imaginario que pasa por los polos y que forma un ángulo medio de $23^{\circ}27'$ con la normal al plano de la eclíptica, figura 2-8. Debido a esta inclinación, el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre varía a lo largo del año: en verano es mayor que en invierno.

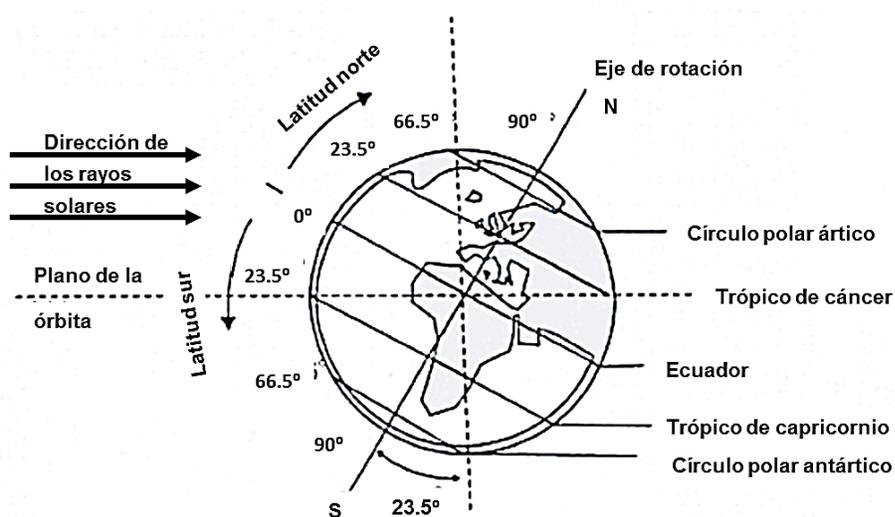


Figura 2-8 Rotación de la Tierra.

Nutación. Es la oscilación periódica del eje de rotación de la Tierra alrededor de su posición media en la esfera celeste, debido a las fuerzas externas de atracción gravitatoria entre la Luna y el Sol con la Tierra. Esta oscilación es similar al movimiento de un trompo cuando pierde fuerza y está a punto de caerse, figura 2-9. A lo largo del año la posición del eje de giro oscila ligeramente alrededor de su posición media (precesión).

El ángulo que forma el plano del ecuador terrestre con la dirección en que se encuentra el Sol se llama *declinación* y varía a lo largo del año, siendo nulo en los equinoccios, máximo en el solsticio de verano y mínimo en el solsticio de invierno, figura 2-10.

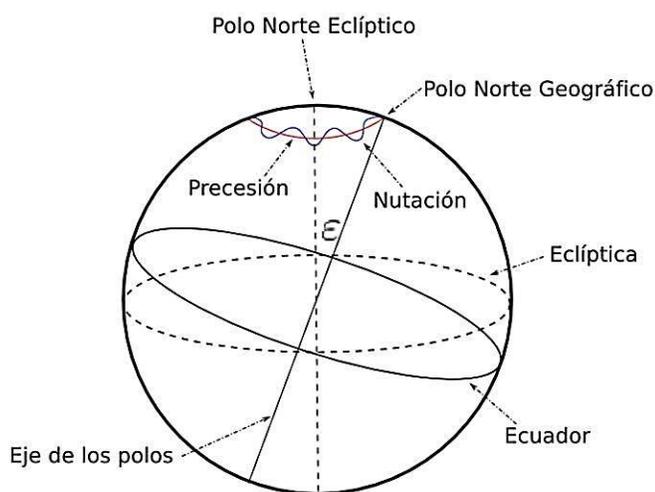


Figura 2-9 Nutación de la Tierra.

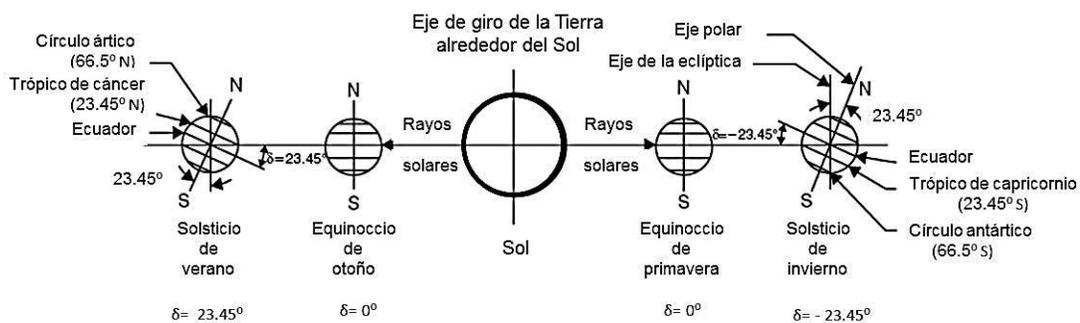
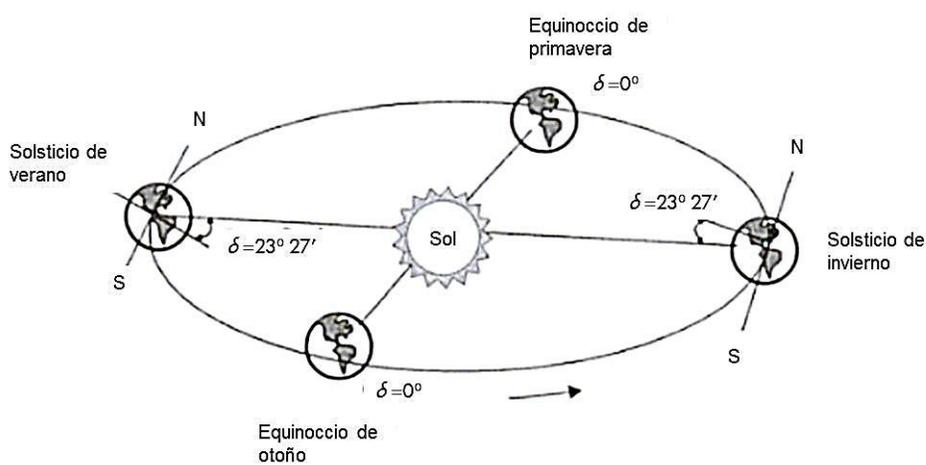


Figura 2-10 Declinación de la Tierra.

Trayectoria aparente del Sol sobre el plano ecuatorial. Para un observador desde la Tierra, el Sol tiene un movimiento anual aparente alrededor de la Tierra y esta trayectoria se llama *la Eclíptica*, figura 2-11.

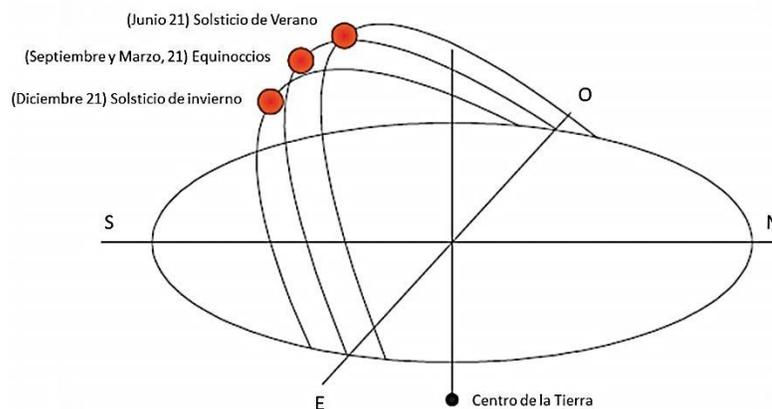


Figura 2-11 Trayectoria aparente del Sol.

2.2.2 Geometría solar

Los efectos atmosféricos sobre la radiación solar están determinados en buena medida por la forma como la Tierra se mueve en torno al Sol. Esto determina no solamente el clima y la presencia de cierto tipo de partículas en la atmosfera, también afecta las trayectorias del Sol vistas desde la Tierra, y por tanto, el camino óptico de la radiación solar y la duración de las horas de insolación.

La principal característica del movimiento de la Tierra, que afecta la forma en que recibimos la radiación solar, es la inclinación de su eje de rotación. Como ya se mencionó, dicho eje está inclinado aproximadamente un ángulo de 23.5° y mantiene su orientación aproximadamente constante a lo largo de la trayectoria de la Tierra sobre su órbita (existe un movimiento de precesión y nutación del eje de rotación, pero es despreciable para las escalas de tiempo de varias generaciones humanas).

La inclinación del eje provoca que la radiación solar incida sobre la superficie terrestre con diferentes inclinaciones a lo largo del año (figura 2-11). Al aumentar la inclinación de una superficie, disminuye la densidad de energía que incide sobre ésta de forma proporcional al coseno del ángulo de incidencia (figura 2-12). La inclinación del eje también afecta la duración del día y la noche y ambos efectos permiten explicar las estaciones del año (figura 2-13). En la figura 2-13 puede observarse que durante el invierno, en el hemisferio norte, la radiación solar incide con un mayor ángulo de

inclinación respecto al hemisferio Sur en donde la incidencia a nivel del trópico es prácticamente perpendicular.

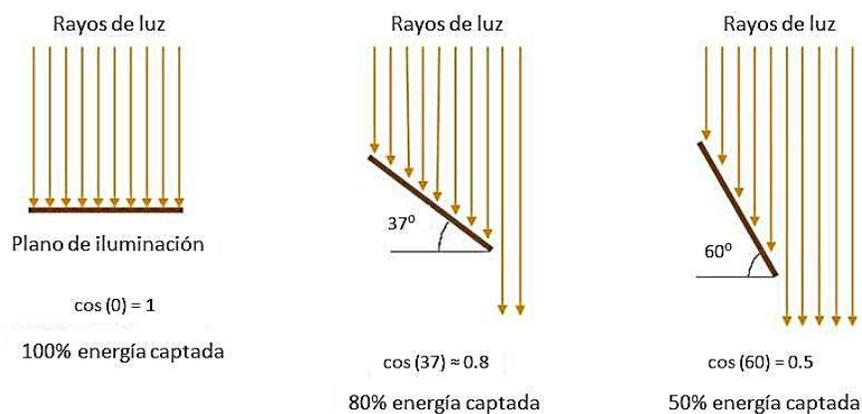


Figura 2-12 Posición de la Tierra sobre su órbita durante los solsticios y equinoccios

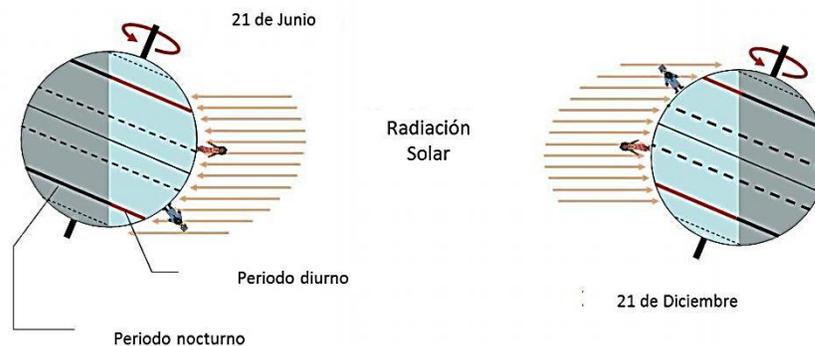


Figura 2-13 Duración del día y la noche en los solsticios

Las trayectorias del Sol que se observan en el cielo dependen del punto de observación sobre la Tierra.

La ubicación de un observador se establece con ayuda de conjuntos de líneas imaginarias, que se dibujan sobre la superficie de la Tierra, y se les conoce como **meridianos** y **paralelos** (figura 2-14). Los **meridianos** son líneas circulares que van desde el polo norte hasta el polo sur geográfico y los **paralelos** son líneas circulares dibujadas de forma perpendicular al eje de rotación de la Tierra. A partir de los meridianos y paralelos la ubicación geográfica de un observador se determina mediante dos ángulos medidos sobre los meridianos y paralelos y se les conoce como **latitud** y **longitud**.

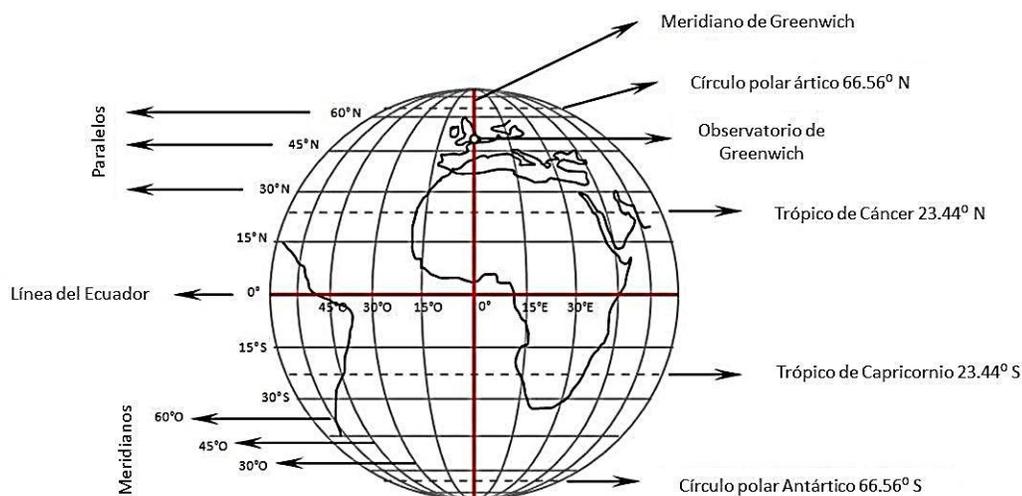


Figura 2-14 Paralelos y meridianos geográficos sobre la Tierra

La **latitud** (φ): es un ángulo que se mide desde el centro de la Tierra hasta el paralelo que contiene al punto de observación. La latitud cero corresponde a al paralelo de mayor diámetro posible conocido como línea del ecuador. Su rango va de 0 a 90° latitud Norte para puntos entre el paralelo del ecuador y en el polo norte y de 0 a 90° Sur para puntos entre el paralelo del ecuador y en el polo Sur.

La **longitud**: es un ángulo que forma la línea del meridiano del observador (meridiano local) con un meridiano de referencia llamado meridiano de Greenwich y que toma su nombre por ser el meridiano que corresponde al antiguo observatorio astronómico de la ciudad de Greenwich. Su rango va desde 0 a 180° longitud Este medido desde el meridiano de Greenwich en el mismo sentido de rotación de la Tierra, y de 0 a 180° Oeste medido desde el meridiano de Greenwich en sentido contrario al de la rotación de la Tierra.

Una persona parada sobre el Ecuador, durante los equinoccios, vería salir al Sol exactamente por el este, subir sobre una línea perpendicular al horizonte hasta el cenit y ocultarse por el oeste. En los solsticios, la misma persona vería que esta misma trayectoria solar se recorre hacia el norte o hacia el sur por la inclinación del eje de la Tierra (figura 2-15). En el caso de una persona situada en algunos de los polos, durante los equinoccios, vería que la trayectoria solar es un círculo paralelo a la línea del horizonte ligeramente por arriba por la refracción de la atmósfera terrestre sobre la radiación solar. El sol giraría en torno al observador sin ocultarse en ningún momento del día. Durante los solsticios, un observador situado en el polo norte vería subir la trayectoria circular del Sol 23.45° sobre el horizonte durante el verano y durante el invierno el Sol estaría 23.45° por debajo del horizonte en una noche que dura aproximadamente 6 meses.

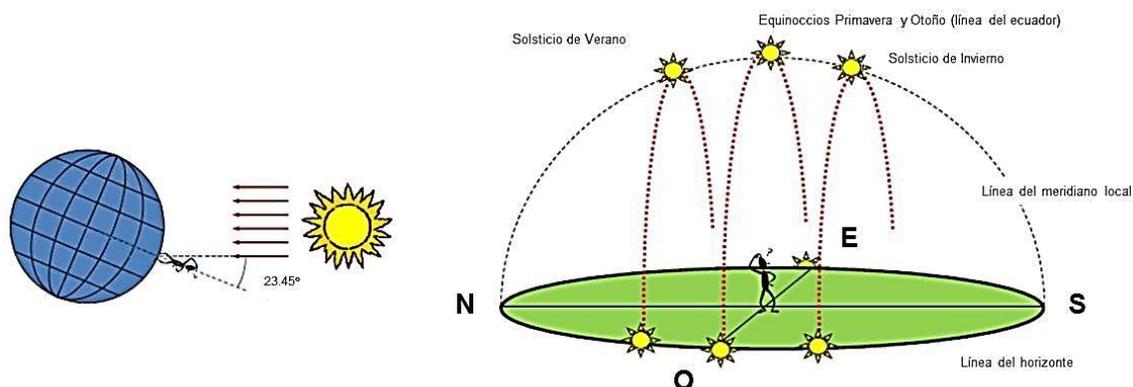


Figura 2-15 Trayectorias solares en el cielo para un observador en el ecuador

Es interesante observar que los planos definidos por las trayectorias del Sol son, en primera aproximación, paralelos entre sí y la orientación de estos planos depende de la ubicación del observador. Para un observador ubicado en cualquier otro punto sobre la Tierra, verá los planos que contienen la trayectoria solar inclinados un ángulo igual a la latitud geográfica del observador (figura 2-16). En general podemos afirmar que la trayectoria solar durante los equinoccios coincide con la línea del ecuador proyectada sobre el cielo.

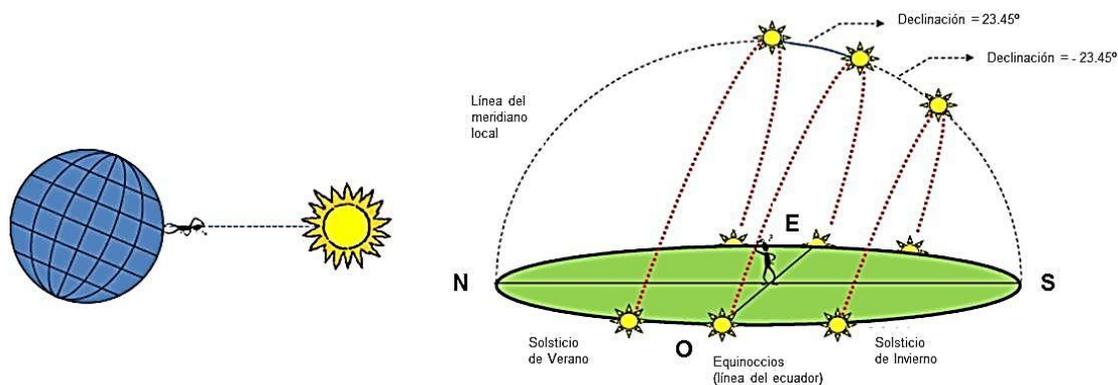


Figura 2-16 Trayectorias solares en el cielo para un observador sobre la línea del trópico de Cáncer

2.2.3 Ángulos solares

Para calcular con precisión las trayectorias solares, es necesario definir coordenadas que permitan determinar claramente la posición del Sol. Dichas coordenadas se muestran en la figura 2-17:

Ángulo Cenital (θ_c) : Este ángulo se mide desde el punto cenital del observador hasta el punto central del disco solar. Su rango varía 0° en el cenit hasta 90° en el horizonte.

Ángulo acimutal (γ): Este ángulo se mide a partir de una línea perpendicular al horizonte que baja desde el centro del disco solar, el ángulo acimutal se mide desde esta línea hasta el punto cardinal Sur geográfico del observador. En ángulo es negativo desde el Sur hacia el Este y positivo desde el Sur hacia el Oeste. Su rango varía desde -180° hasta $+180^\circ$, ambos valores corresponden con el punto cardinal Norte.

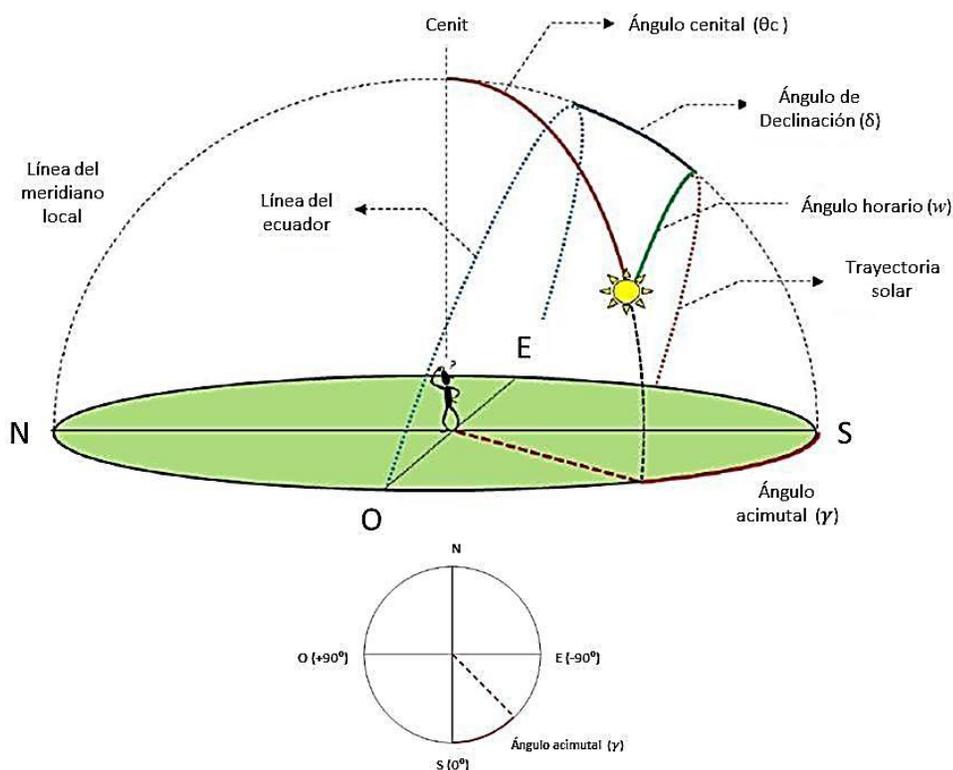


Figura 2-17 Representación tridimensional de los ángulos solares en la bóveda terrestre

Declinación (δ): Es el ángulo que forman el plano ecuatorial con la línea que subtiende un rayo de luz proveniente desde el centro del disco solar hasta el observador. Una forma rápida de visualizar este ángulo es medirlo sobre el meridiano local desde el mediodía solar en un día específico la posición que tendría el Sol al mediodía solar durante un equinoccio. Su Rango comprende desde -23.45° en el solsticio de invierno hasta $+23.45^\circ$ en el solsticio de verano.

Ángulo horario (w): El ángulo horario se refiere al ángulo medido sobre su trayectoria respecto al meridiano local. Este se mide en grados o en horas, en horas en el

entendido que cada hora equivale a un ángulo de 15 grados. Su rango varía desde -180° a 0° para la posición del Sol antes del mediodía y de 0° a 180° para la posición del Sol después del mediodía.

Las primeras dos coordenadas angulares son suficientes para ubicar al Sol en el cielo. Las siguientes son necesarias para ajustar dispositivos de seguimiento del Sol y para su uso en las ecuaciones del cálculo de trayectorias solares. Existen diversos algoritmos para el cálculo de la posición del Sol a través de su ángulo cenital y acimutal.

2.2.4 Constante solar

De acuerdo con la ley de Stefan-Boltzman, la superficie de la fotosfera del Sol emite alrededor de 63.5 millones de W/m^2 . Esta potencia radiada se distribuye por el espacio en todas direcciones, de modo que al llegar a la órbita de la Tierra, a una distancia promedio de 149.6 millones de Km, la irradiancia recibida es de un valor mucho más modesto. Al promedio de irradiancia solar fuera de la atmosfera se le conoce como *constante solar* y su valor más aceptado es:

$$G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$$

El valor de esta constante es el que se estableció en 1980 y representa el trabajo de muchos científicos haciendo mediciones durante más de un siglo, con muy diversos tipos de detectores. Estos detectores fueron montados en naves espaciales, satélites, aviones y globos, para ponerlos a gran altura. El valor de la constante solar mantiene una gran estabilidad con el tiempo, como se puede ver en la figura 2-18. El promedio de estos datos corresponde a un valor de $1366.00 \pm 0.58 \text{ W/m}^2$. Estos datos ya están corregidos compensando la variación de la distancia Tierra-Sol.

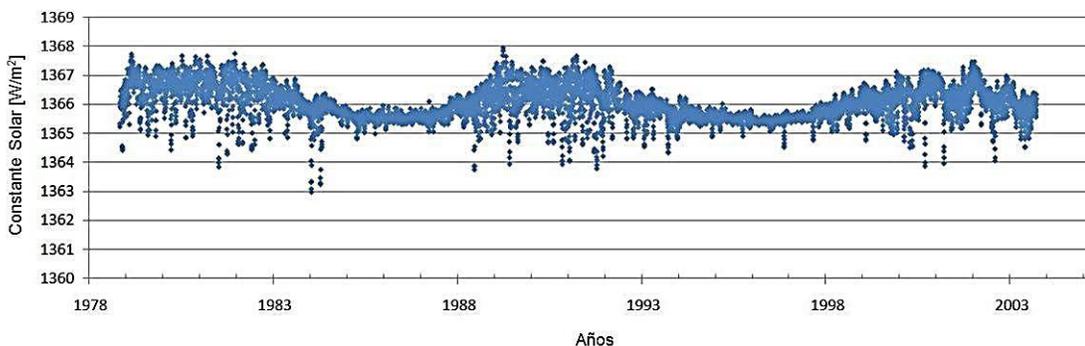


Figura 2-18 Grafico de la variación de la constante solar con datos diarios

Capítulo 3: Centrales solares de chimenea

3.1 Nomenclatura

| | |
|-------------|---|
| A | Área de flujo, m^2 |
| a | Factor dependiente del clima |
| C | Duración de la producción de energía en un determinado día promedio mensual, s/día |
| C_p | Calor específico a presión constante, $J/(kg\ K)$ |
| c | Coefficiente de concentración del colector, adimensional |
| D | Diámetro equivalente, m |
| F' | Factor de eficiencia del colector, adimensional |
| F'' | Factor de eficiencia del flujo, adimensional |
| F_R | Factor de eficiencia en la extracción de calor, adimensional |
| f | Factor de fricción de Colebrook, adimensional |
| f_f | Factor de fricción, adimensional |
| G_b | Irradiancia directa, W/m^2 |
| G_d | Irradiancia difusa, W/m^2 |
| G_{gl} | Irradiancia global, W/m^2 |
| G_{SC} | Constante Solar, W/m^2 |
| g | Aceleración de la gravedad, m/s^2 |
| H_{col} | Altura vertical del colector inclinado, m. |
| \bar{H} | Radiación total diaria promedio mensual en una superficie horizontal, J/m^2 |
| \bar{H}_b | Radiación directa diaria promedio mensual, J/m^2 |
| \bar{H}_d | Radiación difusa diaria promedio mensual, J/m^2 |
| \bar{H}_g | Radiación del terreno promedio diario mensual, J/m^2 |
| \bar{H}_T | Radiación total diaria promedio mensual sobre superficie inclinada, J/m^2 |
| \bar{H}_0 | Radiación extraterrestre diaria promedio mensual sobre superficie horizontal, J/m^2 |
| h | coeficiente de convección, $W/m^2\ K$, altura, m |
| I | Irradiación solar, W/m^2 |
| \bar{K}_T | Índice de claridad diario promedio mensual, adimensional |
| k | Conductividad térmica, $W/m\ K$ |
| L | Longitud del canal, m; Longitud equivalente, m |
| Ma | Número de Mach |
| \dot{m} | Flujo másico, kg/s |
| N | Número de cubiertas superiores |
| N_u | Número de Nusselt |
| n | Día Juliano |
| p | Presión, Pa |

| | |
|-------------|---|
| \bar{Q}_u | Calor útil captado promedio mensual, W |
| q'' | Flujo de calor, W/m ² |
| q_c | Calor perdido por la cubierta, W/m ² |
| \bar{q}_u | Flujo de calor útil promedio mensual, W/m ² |
| R | Constante de los gases ideales, J/(kg K) |
| R_a | Número de Rayleigh |
| \bar{R}_b | Haz de radiación media mensual, J/m ² |
| r | Radio, m |
| S | Separación entre canales |
| \bar{S} | Radiación solar promedio mensual absorbida por una superficie inclinada con orientación sur, J/m ² |
| T | Temperatura absoluta, K; Temperatura superficial, °C |
| t | Tiempo, segundos |
| U | Coefficiente de pérdida del colector W/(m ² K) |
| V | Velocidad de flujo, m/s; Velocidad del aire en el colector y la chimenea, m/s |
| W | Ángulo horario, grados |
| x | Relación de presión, eq. 3.2 |
| v | Volumen específico, m ³ /kg |
| \dot{W} | Potencia, W |
| z | Coordenada cartesiana en dirección vertical; Altura evaluada entre la entrada y la salida del colector, m |

Símbolos griegos

| | |
|------------------|--|
| α | Coefficiente de absorción, adimensional |
| $\bar{\alpha}$ | Promedio mensual del coeficiente de absorción del suelo |
| $\bar{\alpha}_n$ | Promedio mensual del coeficiente de absorción correspondiente al tipo de radiación |
| β | Inclinación, grados |
| β' | Coefficiente volumétrico de expansión; para gas ideal, (1/K) |
| γ | Ángulo acimutal, grados |
| γ_{cp} | Relación de calor específico, adimensional |
| δ | Declinación, grados |
| ϵ | Emisividad |
| ε | Viscosidad vórtice, Pa · s |
| Δp | Caída de presión, Pa |
| Δp_{chi} | Diferencial de presión en la chimenea, Pa |
| Δp_{col} | Diferencia de presión generada en el colector, Pa |
| Δp_{din} | Presión dinámica, Pa |
| Δp_f | Pérdidas por fricción en el colector y la chimenea, Pa |
| Δp_{KE} | Pérdidas de energía cinética en la salida de la chimenea, Pa |
| Δp_T | Pérdidas en la turbina, Pa |
| Δp_{tot} | Diferencia de presión total generada, Pa |

| | |
|--------------------|---|
| ΔT | Aumento de la temperatura entre la temperatura ambiente y la salida del colector, K |
| η | Eficiencia |
| θ | Ángulo de incidencia, grados |
| θ_c | Ángulo cenital, grados |
| $\bar{\theta}_b$ | Promedio mensual del ángulo de incidencia para radiación directa, grados |
| $\bar{\theta}_d$ | Promedio mensual del ángulo de incidencia para radiación difusa, grados |
| $\bar{\theta}_g$ | Promedio mensual del ángulo de incidencia para radiación reflejada por el suelo, grados |
| μ | Viscosidad dinámica, Pa · s |
| ρ | Densidad, kg/m ³ |
| ρ_{gr} | Albedo |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann, (5.67 x 10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴) |
| τ | Coefficiente de transmisión; tiempo |
| $\bar{\tau}$ | Coefficiente de transmisión promedio mensual |
| $\bar{\tau}\alpha$ | Producto transmitancia - absorbancia promedio mensual |
| ν | Viscosidad cinemática, m ² /s |
| φ | Latitud, grados |
| ω | Ángulo horario de un punto en la superficie terrestre, grados |
| ω_s | Ángulo horario de puesta de sol para superficie horizontal, grados |
| ω'_s | Ángulo horario de puesta de sol para superficie inclinada, grados |

Subíndices

| | |
|--------------------|---|
| 1,2,3,4 | Posición a lo largo de la central de chimenea |
| <i>a</i> | Aire; Ambiente |
| <i>b</i> | Directa |
| <i>c</i> | Cubierta |
| <i>chi</i> | Chimenea |
| <i>col</i> | Colector |
| <i>d</i> | Difusa |
| <i>dyn</i> | Componente de presión dinámico |
| <i>ext</i> | Extracción |
| <i>f</i> | Fricción |
| <i>fm</i> | Promedio en el fluido |
| <i>gl</i> | Global |
| <i>gr</i> | Suelo |
| <i>KE</i> | Energía cinética |
| <i>opt</i> | Óptimo |
| <i>p</i> | Placa ó superficie absorbadora |
| <i>tot</i> | Total |
| <i>turb</i> | Turbina |
| <i>con turbina</i> | Con turbina |

| | |
|--------------------|---------------|
| <i>sin turbina</i> | Sin turbina |
| w | Viento, pared |
| ∞ | Flujo libre |

3.2 Introducción

En este capítulo se muestran los modelados matemáticos de un sistema solar de chimenea convencional y el del sistema de chimenea propuesto. El sistema convencional es con un colector circular horizontal y chimenea cilíndrica; el sistema propuesto consta de un colector triangular inclinado y una chimenea convergente. Esto se lleva a cabo a fin de validar ambos modelos y compararlos en igualdad de condiciones.

Las tres partes principales que componen una central solar de chimenea convencional son el sistema colector (cubierta traslúcida), la chimenea y la turbina de aire, como se muestra en la figura 3-1. El aire ambiente entra en el sistema colector desde la periferia de éste y se calienta principalmente por convección a lo largo del suelo caliente debajo de la superficie traslúcida. El aire entra en el parte inferior de la chimenea debido al potencial de presión generado por la diferencia de densidad entre el aire caliente y el aire ambiente.

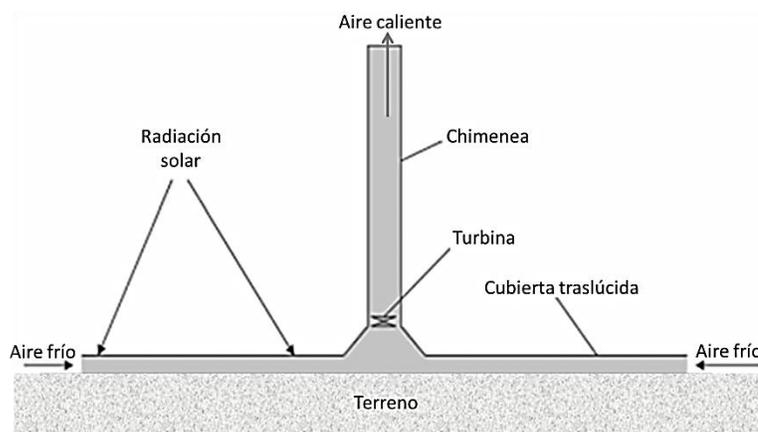


Figura 3-1 Componentes principales de una central solar de chimenea convencional

El sistema solar de chimenea propuesto sigue el mismo principio de funcionamiento que la convencional, el aire ambiente entra en el sistema colector desde el exterior por la parte baja del colector, calentándose a lo largo de la superficie caliente debajo de la cubierta traslúcida. Así mismo, el aire entra en el parte inferior de la chimenea debido al potencial de presión generado por la diferencia de densidad entre el aire caliente y el aire ambiente, e inducido por el ángulo de inclinación del colector y la forma triangular convergente del mismo. En el sistema solar de chimenea propuesto, sus

elementos principales son los mismos que en la convencional (colector, chimenea y turbina), solo que el colector, además de ser triangular, tiene una inclinación con respecto a la horizontal con la finalidad de optimizar la captación de energía solar, como se analizará ampliamente más adelante; adicionalmente, la chimenea no es de sección constante, es convergente hacia su salida en forma de tobera, a fin de acelerar el flujo de aire caliente a su paso por la chimenea, como se muestra en la figura 3-2.

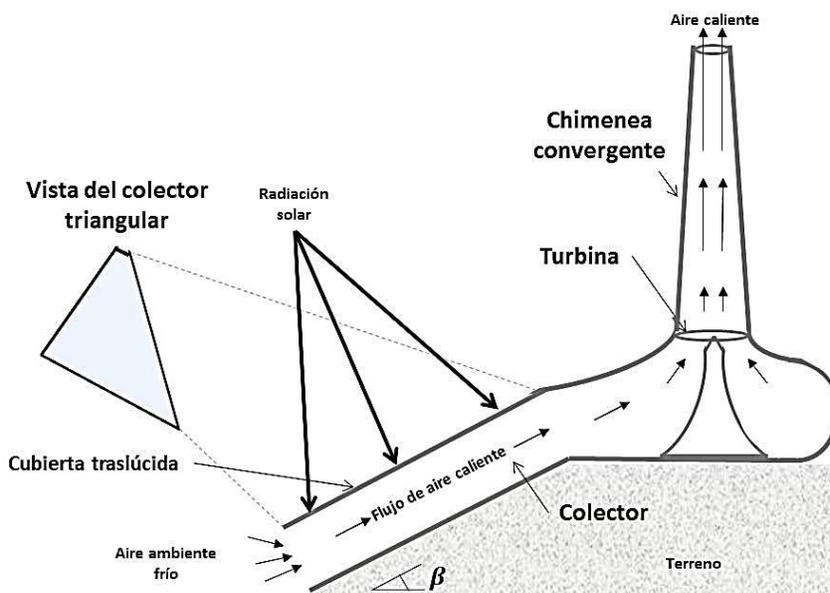


Figura 3-2 Componentes principales de la central solar de chimenea propuesta

3.3 Modelo matemático central solar de chimenea convencional

De acuerdo con el principio de funcionamiento mencionado en el párrafo anterior, el aire dentro del sistema es menos denso que el aire atmosférico exterior. El aire se mueve dentro y fuera del sistema de chimenea solar continuamente, impulsado por la diferencia de presión entre el interior y el exterior.

Esta diferencia de presión se denomina presión disponible de conducción y se simboliza como Δp_{tot} . Despreciando las pérdidas por fricción (Koonsrisuk A L. S., 2010), Δp_{tot} puede ser subdividido en una componente de extracción de la turbina, Δp_{turb} , que representa la presión extraída por la turbina, y un componente dinámico, Δp_{din} , que describe la energía cinética del flujo de aire, (Atit Koonsrisuk, Mathematical modeling of solar chimney power plants, 2012):

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{turb} + \Delta p_{din} \quad (3.1)$$

Definiendo la relación $\Delta p_{turb} / \Delta p_{tot}$ como x , de modo que:

$$\Delta p_{turb} = x \Delta p_{tot} \quad (3.2)$$

Utilizando la definición estándar para la presión dinámica, se obtiene:

$$\Delta p_{din} = \frac{1}{2} \rho_{chi} V_{con turbina}^2 \quad (3.3)$$

Sin la turbina, la velocidad de flujo máxima se logra y todo el potencial de conducción se utiliza para acelerar el flujo, de modo que:

$$\Delta p_{tot} = \frac{1}{2} \rho_{chi} V_{sin turbina}^2 \quad (3.4)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.2 y 3.4 en la ecuación 3.1, resulta:

$$V_{con turbina} = V_{sin turbina} \sqrt{(1 - x)} \quad (3.5)$$

La potencia teórica extraída por la turbina se puede determinar de la ecuación de la energía y la relación de Gibbs, desde la clásica termodinámica:

$$\dot{W}_{ext} = \dot{m} \int v dp \approx \frac{\dot{m}}{\rho_{turb}} \Delta p_{turb} \quad (3.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.2 y 3.5 en la ecuación 3.6, y utilizando $\dot{m} = \rho_{turb} A_{chi} V_{con turbina}$, obtenemos:

$$\dot{W}_{ext} = A_{chi} \sqrt{1 - x} V_{sin turbina} x \Delta p_{tot} \quad (3.7)$$

La x óptima para la extracción máxima de potencia se pueden obtener asumiendo que $V_{no turbina}$ y Δp_{tot} no son funciones de x , y resolviendo $(\partial \dot{W}_{ext}) / \partial x = 0$. El resultado de la relación de presión óptima es:

$$x_{opt} = \frac{2}{3} \quad (3.8)$$

En consecuencia, se obtiene la potencia máxima cuando la presión de extracción de la turbina es 2/3 de la presión de conducción disponible, que corresponden al valor que la mayoría de los investigadores han utilizado. Usando nuestros supuestos, la relación óptima de la presión de 2/3 es válido sólo para los sistemas de conducción de presión constante (es decir, para el aire con aumento de temperatura constante).

La ecuación 3.7 muestra que la salida de energía de la central solar puede ser incrementada mediante el ajuste de la presión de extracción de la turbina. Posteriormente

se mostrará que el cambio de x afecta \dot{m} , \dot{W}_{ext} y Δp_{tot} . Como resultado, la suposición de que Δp_{tot} no es una función de x haría inexacta la potencia prevista.

En la Figura 3-3 se muestran los puntos de análisis donde: 1 es la entrada al colector en todo su perímetro, 2 es la salida del colector en todo su perímetro, 3 es la sección de entrada a la chimenea y 4 es la sección de salida de la chimenea; el aumento de temperatura puede estimarse a partir de la ecuación de la energía a través de la parte de la cubierta:

$$\dot{m} C_p (T_2 - T_1) + \frac{1}{2} \dot{m} (V_2^2 - V_1^2) = q'' A_{col} \quad (3.9)$$

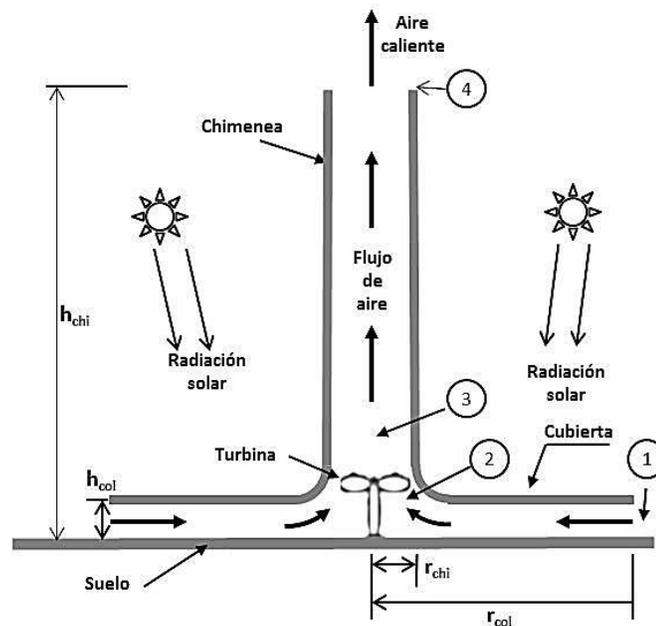


Figura 3-3 Diseño esquemático de una central solar de chimenea convencional

Por motivos de simplicidad, el efecto de fricción es ignorado puesto que la velocidad en esta región es bastante baja. Debido a que el flujo en el régimen del número de Mach es muy bajo, la contribución de la energía cinética en este punto puede ser ignorada de forma segura, por lo tanto,

$$\dot{m} C_p \Delta T = q'' A_{col} \quad (3.10)$$

Cuando la radiación solar de entrada se supone constante, la ecuación 3-10 muestra que el aumento de temperatura es directamente proporcional a la tasa de flujo de masa. En este análisis, la turbina se trata como el disco actuador de Rankinee-Froude. Los supuestos sobre los que se basa este disco actuador se enumeran de la siguiente manera (Koonsrisuk, 2012):

- Viento estable, homogéneo
- Velocidad de flujo uniforme en el disco
- La presión estática disminuye de forma discontinua a través del disco
- Sin rotación del flujo producido por el disco

En consecuencia, la ecuación 3-6 se convierte,

$$\dot{W}_{ext} = \frac{\dot{m}}{\frac{(\rho_2 + \rho_3)}{2}} (p_2 - p_3) \quad (3.11)$$

Al sintetizar las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y de energía del flujo bajo la cubierta, Chitsomboon (T., 2001), propuso que:

$$p_2 - p_1 = \int_1^2 \frac{\rho V^2}{(1 - M_a^2)} \left(\frac{dA}{A} - \frac{q'' dA_{col}}{\dot{m} C_p T} \right) \quad (3.12)$$

Suponiendo que q'' , C_p y \dot{m} son constantes, ρ y T pueden ser aproximada a ρ_1 y T_1 sin afectar significativamente los valores numéricos de los términos. El número de Mach se asume de nuevo muy bajo, y por lo tanto, se puede despreciar; a continuación, la ecuación simplificada es,

$$p_2 = p_1 + \frac{\dot{m} q''}{2 \pi h_{col}^2 \rho_1 C_p T_1} \ln \frac{r_{col}}{r_{chi}} - \frac{\dot{m}^2}{2 \rho_1} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \quad (3.13)$$

Donde p_1 , ρ_1 y T_1 se aproximan como p_∞ , ρ_∞ y T_∞ , respectivamente. La ecuación 3.13 muestra que p_2 es la combinación de la presión de entrada, p_1 , con el aumento de presión debido a la adición de calor, $(\dot{m} q'' / 2 \pi h_{col}^2 \rho_1 C_p T_1) \ln(r_{col}/r_{chi})$, y la disminución de la presión debido al flujo por la reducción de la superficie hacia el centro de la cubierta, $(\dot{m}^2 / 2 \rho_1)(1/A_2^2 - 1/A_1^2)$.

El orden del análisis de las magnitudes revela que $(\dot{m}^2 / 2 \rho_1)(1/A_2^2 - 1/A_1^2)$ es significativamente mayor que $(\dot{m} q'' / 2 \pi h_{col}^2 \rho_1 C_p T_1) \ln(r_{col}/r_{chi})$.

Reordenando la ecuación 3.10 se produce:

$$T_2 = T_1 + \frac{q'' A_{col}}{\dot{m} C_p} \quad (3.14)$$

Donde según Duffie J y Beckman WA (John A. Duffie, 1991):

$$q'' = \alpha I - U \Delta T \quad (3.15)$$

Cabe señalar que ΔT en la ecuación 3.15 es la diferencia de temperatura entre el aire dentro y fuera del colector solar, que se supone aquí es igual a $(T_2 - T_1)$.

En consecuencia,

$$\Delta T = \frac{\alpha I}{\dot{m} c_p / A_{col} + U} \quad (3.16)$$

Si se supone que el proceso de extracción de trabajo en la turbina es un proceso isentrópico, a continuación,

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma c_p^{-1}}{\gamma c_p^{-1}}} \quad (3.17)$$

Por otra parte, reordenando las ecuaciones de la dinámica y la continuidad para el flujo a través de una zona de la chimenea de altura constante, h_{chi} , (figura 3-3), obtenemos:

$$p_3 = p_4 + \frac{1}{2}(\rho_3 + \rho_4) g h_{chi} + \left(\frac{\dot{m}}{A_{chi}} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_4} - \frac{1}{\rho_3} \right) \quad (3.18)$$

Si tenemos en cuenta el aire de la atmósfera fuera del sistema de chimenea solar, el equilibrio hidrostático que requiere es:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (3.19)$$

Según JG. Calvert, cuando la porción de aire atmosférico es considerado como un medio no saturado y se expande lentamente a una presión atmosférica más baja sin intercambio de calor, la ecuación del gradiente de temperatura seca adiabática puede escribirse como, (JG., 1990):

$$T = T_\infty - \frac{g}{c_p} z \quad (3.20)$$

Suponiendo que el aire obedece al estado de gas ideal en la ecuación 3.20, puede ser sustituido en la ecuación 3.19 para dar p_4 , para el aire exterior como:

$$p_4 = p_\infty \left(1 - \frac{g}{c_p T_\infty} h_{chi} \right)^{\frac{c_p}{R}} \quad (3.21)$$

Hay que considerar que el gradiente adiabático seco se puede aplicar al flujo en la chimenea. De acuerdo con la ecuación 3.20,

$$T_4 = T_3 - \frac{g}{c_p} h_{chi} \quad (3.22)$$

Para un gas ideal,

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} \quad , \quad \rho_3 = \frac{p_3}{R T_3} \quad , \quad \rho_4 = \frac{p_4}{R T_4} \quad (3.23)$$

Teóricamente, la presión de conducción de la chimenea solar (Δp_{tot}) es la diferencia entre los potenciales de presión causadas por la columna de aire frío fuera de la chimenea y la columna correspondiente al aire caliente dentro de la chimenea (Zhou XP, 2012). Considerando la posibilidad de que la presión en el salida de la chimenea y la presión fuera de la chimenea, pero a la misma altura, son aproximadamente iguales. Por consiguiente, en este análisis se propone:

$$\Delta p_{tot} = p_1 - p_3 \quad (3.24)$$

Se puede argumentar que la definición anterior establece a Δp_{tot} es insensible a la altura de la chimenea, sin embargo, la simulación numérica de diferentes tamaños de centrales, mostraron que Δp_{tot} , calculada usando la ecuación 3.24, es una función de la altura de la chimenea.

3.3.1 Procedimiento de solución

De acuerdo con la formulación anterior, si la tasa de flujo de masa es conocida o supuesta, la potencia de salida se puede determinar. Las etapas para calcular la energía de salida de la central son:

1. Seleccionar la tasa de flujo de masa
2. Calcular T_2 utilizando la ecuación 3.16
3. Calcular q'' usando la ecuación 3.15
4. Calcular p_2 usando la ecuación 3.13
5. Calcular ρ_2 usando la ecuación 3.23
6. Calcular p_4 usando la ecuación 3.21
7. Suponer p_3 , a continuación, calcular T_3 , ρ_3 , T_4 , ρ_4 utilizando la ecuación 3.17, la ecuación 3.23, la ecuación 3.22 y la ecuación 3.23, respectivamente. Calcular p_3 usando la ecuación 3.18, después, comparar el nuevo p_3 a la primera p_3 . Realizar la iteración hasta que la diferencia entre el nuevo y el antiguo p_3 sea inferior a un valor aceptable.
8. Calcular \dot{W}_{ext} usando la ecuación 3.11
9. Calcular Δp_{tot} usando la ecuación 3.24

3.3.2 Validación del modelo con datos experimentales

Para validar el modelo analítico, los datos teóricos se compararon con los resultados experimentales del prototipo de Manzanares, España. Las dimensiones se dan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Dimensiones geométricas de la planta piloto en Manzanares, España.

| | |
|---|---------|
| Radio medio de la cubierta, r_{col} | 122 m |
| Altura media de la cubierta por encima del suelo, h_{col} | 1.85 m |
| Altura de la chimenea, h_{chi} | 194.6 m |
| Radio de la chimenea, r_{chi} | 5.08 m |

Se adoptaron los datos de medición del 02 de septiembre de 1982 a partir del trabajo realizado por (Haaf W. , 1984). Las comparaciones entre las predicciones teóricas y los valores experimentales se presentan en la Tabla 3-2. Basándose en los datos proporcionados por el artículo de referencia, en lugar de utilizar la ecuación 3.15, q'' fue calculado a partir de:

$$q'' = \eta_{col} I \quad (3.25)$$

Tabla 3-2 Comparación entre los datos medidos en la planta piloto de Manzanares (Haaf W. , 1984) y los resultados teóricos del presente trabajo.

| Tiempo | | 10:00 | 12:00 | 14:00 | 16:00 |
|--------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| I (W/m ²) | | 744.4 | 850 | 755.6 | 455.6 |
| η_{col} (%) | | 24.3 | 27.1 | 25.7 | 23.6 |
| T_1 (°C) | | 21.1 | 23.4 | 26.1 | 27.9 |
| ΔT_{1-2} (°C) | | 14.8 | 17.8 | 17.4 | 11.3 |
| V_4 (m/s) | Medido | 7 | 9 | 7 | 7.7 |
| | Teórico | 7.90 | 8.65 | 8.51 | 6.80 |
| | % | 11.4 | 3.9 | 17.7 | 11.7 |
| Δp_{turb} (mbar) | Medido | 0.8 | 0.8 | 0.84 | 0.6 |
| | Teórico | 0.65 | 0.76 | 0.73 | 0.48 |
| | % | 18.7 | 5.0 | 13.0 | 20.0 |

donde η_{col} es la eficiencia del colector (que se define como en la ecuación 3.26), los valores de I , η_{col} , T_1 , ΔT_{1-2} , V_4 (medidas) y Δp_{turb} (medida) que se muestra en la tabla 3-2 se han tomado de la referencia (Haaf W. , 1984). Esto es consistente con la "aproximación conservadora" de p_2 como se ha indicado en la referencia. (T., 2001). El

acuerdo es aceptable, 11% y 14%, entre los resultados experimentales y teóricos para V_4 y Δp_{turb} , respectivamente, como se puede ver claramente a toda la gama de I .

$$\eta_{col} = \frac{\dot{m} c_p \Delta T_{1-2}}{q'' A_{col}} \quad (3.26)$$

Por otra parte, los datos medidos de la central prototipo de Manzanares el 01 de septiembre de 1989 se han tomado de la referencia (Weinrebe G, 2001), los datos adoptados se presentan en la Tabla 3-3. Las comparaciones que se muestran en la Tabla 3-4 indican una buena concordancia entre los resultados teóricos y los experimentales, que deben apoyar la fiabilidad de los modelos propuestos.

Tabla 3-3 Datos de la planta piloto de Manzanares (Weinrebe G, 2001)

| | |
|--|--------|
| Radiación solar global (W/m^2), I | 1017 |
| Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), T_1 | 18.5 |
| Presión ambiente (Pa), p_1 | 92,930 |
| Coefficiente de absorción del colector, α | 0.65 |
| Coefficiente de pérdidas del colector ($\text{W/m}^2 \text{K}$), U | 15 |
| Eficiencia de la turbina | 0.85 |
| Eficiencia del generador y de la caja de engranajes | 0.9 |
| Velocidad en la salida de la chimenea (m/s), V_4 | 8.1 |

Tabla 3-4 Comparación entre los datos medidos de la planta piloto de Manzanares (Weinrebe G, 2001) y los resultados teóricos del presente trabajo (datos del 1 de septiembre de 1989)

| Parámetro | Medido | Teórico |
|------------------------------|--------|---------|
| T_2 ($^{\circ}\text{C}$) | 38 | 37.91 |
| \dot{W}_{ext} (kW) | 48.4 | 48.38 |

3.4 Centrales solares de chimenea de colector inclinado (propuesto)

El diseño de una central solar de chimenea de colector con la superficie inclinada tiene una gran ventaja: si la pendiente del colector está optimizado, la radiación solar recibida por el sistema se puede mejorar a un nivel satisfactorio para todo un año de operación.

3.4.1 Descripción del sistema

El sistema de la central solar de chimenea estudiado consta de los siguientes componentes principales: el colector inclinado, la chimenea y la turbina, como se muestra en la figura 3-4. El colector tiene un área de superficie triangular con una chimenea en su vértice. Los lados están cerrados, el aire entra desde la parte inferior, calentado por el suelo, y se eleva al vértice del colector, donde se ha instalado una chimenea vertical.

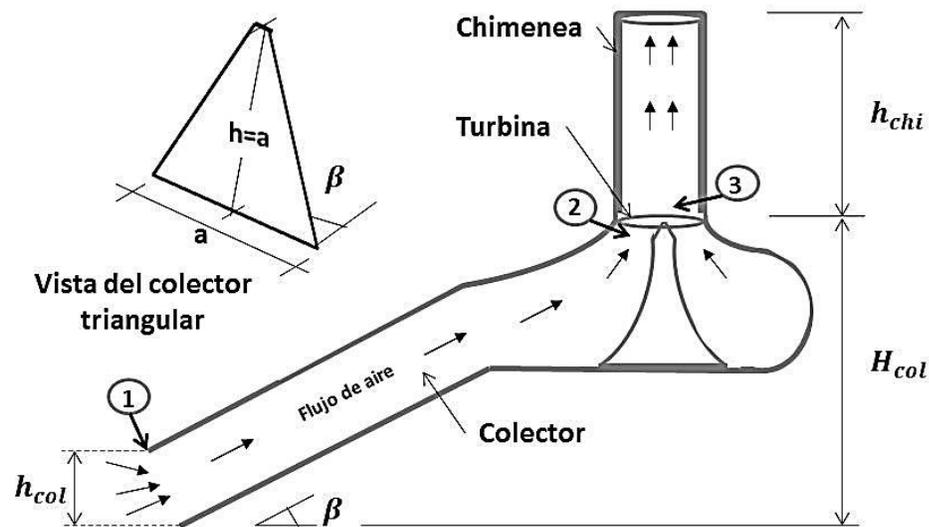


Figura 3-4 Vista de la sección de colector inclinado

3.4.2 Modelo Matemático y código

El modelo de simulación y el código se desarrollaron siguiendo los métodos de evaluación del rendimiento a largo plazo del sistema mediante la media mensual de la radiación absorbida. Los datos meteorológicos necesarios son: la radiación solar media mensual sobre una superficie horizontal, la temperatura media mensual del aire y la velocidad del viento durante un día típico de cada mes.

El código de simulación consiste en lo siguiente:

- El modelo matemático para calcular la radiación solar recibida por el colector inclinado.
- El modelo de optimización para determinar el ángulo de inclinación óptimo basado en la energía solar máxima anual captada.

3.4.3 Modelo de la radiación solar

Como ya se mencionó en la sección 2.1.3, el calor solar que llega a la superficie terrestre se reduce como resultado de la interacción atmosférica con la radiación solar, por lo que la radiación recibida por una superficie en la tierra es la suma de la radiación difusa y la componente normal de la radiación directa. El calor solar en cualquier punto de la Tierra depende de:

1. El espesor de la capa de ozono.
2. La distancia recorrida por la atmósfera para llegar a ese punto.
3. La cantidad de neblina en el aire (partículas de polvo, vapor de agua, etc).
4. La extensión de la capa de nubes.

Un sistema solar necesita ser medio por sus resultados a largo plazo, por lo que es necesario el conocimiento de la insolación diaria promedio mensual, la radiación solar diaria promedio mensual (directa más difusa) que incide sobre una superficie horizontal, \bar{H} , y el índice de claridad promedio mensual, \bar{K}_T , que se define como:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (3.27)$$

Donde \bar{H} es la radiación total diaria promedio mensual en una superficie horizontal, y \bar{H}_0 la radiación extraterrestre diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal.

La línea sobre los símbolos significa un promedio a largo plazo. El valor de \bar{H}_0 puede calcularse a partir de la ecuación 3.28. En la tabla 3-4 se muestran los valores de \bar{H}_0 para cada mes como una función de la latitud, junto con las fechas recomendadas de cada mes de los valores medios diarios de \bar{H}_0 .

$$\bar{H}_0 = \frac{(24)(3600) G_{SC}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \right) \quad (3.28)$$

Donde δ es la declinación solar, ya definida anteriormente, es el ángulo entre el eje Tierra-Sol y la proyección de esta línea sobre el plano ecuatorial. Declinaciones al norte del ecuador son positivas, y las del sur son negativas:

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (3.29)$$

El sol sale y se oculta en el horizonte cuando el ángulo de altitud solar es 0° . Así, el ángulo horario de puesta de sol para una superficie horizontal, ω_s :

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (3.30)$$

Tabla 3-4 Promedio mensual diario de radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal (MJ/m^2) (Kalogirou, Solar energy engineering : processes and systems, 2009)

| Latitud | 17 Ene | 16 Feb | 16 Mar | 15 Abr | 15 May | 11 Jun | 17 Jul | 16 Ago | 15 Sept | 15 Oct | 14 Nov | 10 Dic |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 60° S | 41.1 | 31.9 | 21.2 | 10.9 | 4.4 | 2.1 | 3.1 | 7.8 | 16.7 | 28.1 | 38.4 | 43.6 |
| 55° S | 41.7 | 33.7 | 23.8 | 13.8 | 7.1 | 4.5 | 5.6 | 10.7 | 19.5 | 30.2 | 39.4 | 43.9 |
| 50° S | 42.4 | 35.3 | 26.3 | 16.8 | 10.0 | 7.2 | 8.4 | 13.6 | 22.2 | 32.1 | 40.3 | 44.2 |
| 45° S | 42.9 | 36.8 | 28.6 | 19.6 | 12.9 | 10.0 | 11.2 | 16.5 | 24.7 | 33.8 | 41.1 | 44.4 |
| 40° S | 43.1 | 37.9 | 30.7 | 22.3 | 15.8 | 12.9 | 14.1 | 19.3 | 27.1 | 35.3 | 41.6 | 44.4 |
| 35° S | 43.2 | 38.8 | 32.5 | 24.8 | 18.6 | 15.8 | 17.0 | 22.0 | 29.2 | 36.5 | 41.9 | 44.2 |
| 30° S | 43.0 | 39.5 | 34.1 | 27.2 | 21.4 | 18.7 | 19.8 | 24.5 | 31.1 | 37.5 | 41.9 | 43.7 |
| 25° S | 42.5 | 39.9 | 35.4 | 29.4 | 24.1 | 21.5 | 22.5 | 26.9 | 32.8 | 38.1 | 41.6 | 43.0 |
| 20° S | 41.5 | 39.9 | 36.5 | 31.3 | 26.6 | 24.2 | 25.1 | 29.1 | 34.2 | 38.5 | 41.1 | 42.0 |
| 15° S | 40.8 | 39.7 | 37.2 | 33.1 | 28.9 | 26.8 | 27.6 | 31.1 | 35.4 | 38.7 | 40.3 | 40.8 |
| 10° S | 39.5 | 39.3 | 37.7 | 34.6 | 31.1 | 29.2 | 29.9 | 32.8 | 36.3 | 38.5 | 39.3 | 39.3 |
| 5° S | 38.0 | 38.5 | 38.0 | 35.8 | 33.0 | 31.4 | 32.0 | 34.4 | 36.9 | 38.1 | 37.9 | 37.6 |
| 0° | 36.2 | 37.4 | 37.9 | 36.8 | 34.8 | 33.5 | 33.9 | 35.7 | 37.2 | 37.3 | 36.4 | 35.6 |
| 5° N | 34.2 | 36.1 | 37.5 | 37.5 | 36.3 | 35.3 | 35.6 | 36.7 | 37.3 | 36.3 | 34.5 | 33.5 |
| 10° N | 32.0 | 34.6 | 36.9 | 37.9 | 37.5 | 37.0 | 37.1 | 37.5 | 37.0 | 35.1 | 32.5 | 31.1 |
| 15° N | 29.5 | 32.7 | 35.9 | 38.0 | 38.5 | 38.4 | 38.3 | 38.0 | 36.5 | 33.5 | 30.2 | 28.5 |
| 20° N | 26.9 | 30.7 | 34.7 | 37.9 | 39.3 | 39.5 | 39.3 | 38.2 | 35.7 | 31.8 | 27.7 | 25.7 |
| 25° N | 24.1 | 28.4 | 33.3 | 37.5 | 39.8 | 40.4 | 40.0 | 38.2 | 34.7 | 29.8 | 25.1 | 22.9 |
| 30° N | 21.3 | 26.0 | 31.6 | 36.8 | 40.0 | 41.1 | 40.4 | 37.9 | 33.4 | 27.5 | 22.3 | 19.9 |
| 35° N | 18.3 | 23.3 | 29.6 | 35.8 | 39.9 | 41.5 | 40.6 | 37.3 | 31.8 | 25.1 | 19.4 | 16.8 |
| 40° N | 15.2 | 20.5 | 27.4 | 34.6 | 39.7 | 41.7 | 40.6 | 36.5 | 30.0 | 22.5 | 16.4 | 13.7 |
| 45° N | 12.1 | 17.6 | 25.0 | 33.1 | 39.2 | 41.7 | 40.4 | 35.4 | 27.9 | 19.8 | 13.4 | 10.7 |
| 50° N | 9.1 | 14.6 | 22.5 | 31.4 | 38.4 | 41.5 | 40.0 | 34.1 | 25.7 | 16.9 | 10.4 | 7.7 |
| 55° N | 6.1 | 11.6 | 19.7 | 29.5 | 37.6 | 41.3 | 39.4 | 32.7 | 23.2 | 13.9 | 7.4 | 4.8 |
| 60° N | 3.4 | 8.5 | 16.8 | 27.4 | 36.6 | 41.0 | 38.8 | 31.0 | 20.6 | 10.9 | 4.5 | 2.3 |

La cantidad de radiación solar sobre una superficie terrestre en un lugar y tiempo determinados depende de la orientación y la pendiente de la superficie. En el caso de los colectores de placa plana instalado en un cierto ángulo fijo, se cuenta con los datos acerca de la radiación solar en la superficie del colector, pero la mayoría son, ya sea para la incidencia o la horizontal normal. Por lo tanto, a menudo es necesario convertir estos datos a la radiación en las superficies inclinadas. Un método para la estimación de la media de la radiación incidente total diaria mensual sobre una superficie inclinada fue desarrollada por Lui y Jordan (Liu, Application of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, 1977). En su correlación, la relación de la radiación difusa total y la radiación para una superficie horizontal se expresa en términos del índice de claridad mensual, K_T , con la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.390 - 4.027 \bar{K}_T + 5.531 \bar{K}_T^2 - 3.108 \bar{K}_T^3 \quad (3.31)$$

para $0.3 < \bar{K}_T < 0.8$ y $\omega_s > 81.4^\circ$:

$$\bar{H}_d = \bar{H}_T(1.311 - 3.022\bar{K}_T + 3.427\bar{K}_T^2 - 1.821\bar{K}_T^3) \quad (3.32)$$

para $0.3 < \bar{K}_T < 0.8$ y $\omega_s < 81.4^\circ$:

$$\bar{H}_d = \bar{H}_T(1.391 - 3.560\bar{K}_T + 4.189\bar{K}_T^2 - 2.137\bar{K}_T^3) \quad (3.33)$$

El promedio mensual de la irradiación directa media mensual es

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (3.34)$$

El ángulo horario de puesta de sol para superficie inclinada, ω'_s es

$$\omega'_s = \min[\cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta)] \quad (3.35)$$

Finalmente, la ecuación para la radiación total sobre una superficie inclinada es:

$$\bar{H}_T = \bar{R} \bar{H} \quad (3.36)$$

donde:

$$\bar{R} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + \rho_{gr} \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (3.37)$$

3.4.4 Transmisión a través del colector

La energía solar recibida por el colector se transmite a través de una cubierta transparente y es absorbida por el suelo, que se calienta. Una parte importante de la energía absorbida se transfiere al aire ambiente que entra a través de la periferia abierta y sale a través de la chimenea. Una parte se pierde por una combinación de transferencia de calor, a través de la cubierta y el suelo, que son de hecho, igualmente evaluados como un colector solar de aire de placa plana.

El parámetro fundamental a considerar es la eficiencia térmica del colector, se define como la relación de la energía útil entregada por éste y la energía incidente en la cubierta del colector.

La energía solar que incide en una superficie inclinada tiene tres componentes: la radiación directa, la radiación difusa, y la radiación reflejada por el suelo (albedo). Usando un modelo isotrópico sobre una base horaria, se puede determinar la radiación media mensual absorbida, \bar{S} , multiplicando cada término con el producto transmitancia - absorbancia correspondiente:

$$\bar{S} = (\bar{H}_T - \bar{H}_d) \bar{R}_b \overline{(\tau\alpha)}_b + \bar{H}_d \overline{(\tau\alpha)}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \bar{H} \rho_{gr} \overline{(\tau\alpha)}_{gr} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.38)$$

donde los términos $[1 + \cos(\beta)]/2$ y $[1 - \cos(\beta)]/2$ son los factores vistos desde el colector hacia el cielo y desde el colector hacia el suelo, respectivamente.

La combinación de la cubierta con el suelo se muestra en la figura 3-5, junto con la trayectoria de los rayos de la radiación. Como se puede ver, de la energía incidente en el colector, $\tau\alpha$ es absorbida por el suelo y $(1-\alpha)\tau$ se refleja de nuevo a la cubierta del colector. La reflexión desde el suelo se supone que es difusa, por lo que la fracción $(1-\alpha)\tau$ que golpea la cubierta es la radiación difusa y $(1-\alpha)\tau\rho_d$ se refleja de nuevo al suelo. La reflexión múltiple de la radiación difusa continúa de modo que la fracción de la energía solar incidente absorbida en última instancia es:

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=1}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (3.39)$$

Los valores típicos de $(\tau\alpha)$ son 0.7 a 0.75 para el vidrio convencional y 0.9 a 0.85 para el vidrio bajo en hierro. Una aproximación razonable de la ecuación 3.39 para aplicaciones de colectores solares es:

$$(\tau\alpha) \cong 1.01 \tau\alpha \quad (3.40)$$

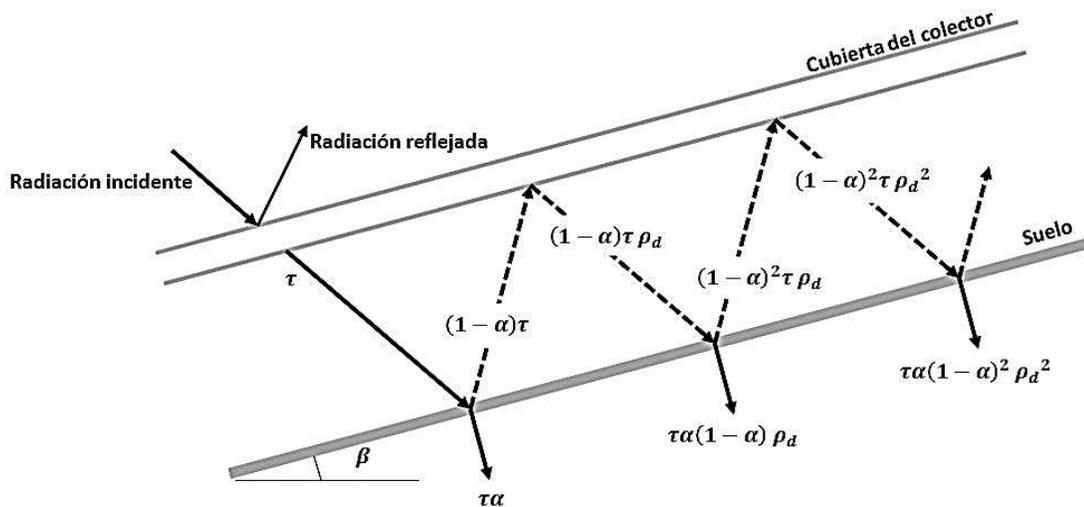


Figura 3-5 Trayectoria de la radiación en el colector

Para un ángulo de inclinación del colector, β , se pueden utilizar las siguientes relaciones derivadas por Brandemuehl y Beckman (Brandemuehl, 1980), para encontrar el ángulo efectivo de incidencia de la radiación difusa, θ_d , y la radiación reflejada del suelo, θ_g :

$$\theta_d = 59.68 - 0.1388 \beta + 0.001497 \beta^2 \quad (3.41)$$

$$\theta_g = 90 - 0.5788 \beta + 0.002693 \beta^2 \quad (3.42)$$

Cuando un haz de radiación incide sobre la superficie de una placa transparente en ángulo θ_1 , llamado ángulo de incidencia, como se muestra en la figura 3-6, parte de la radiación incidente se refleja y el resto se refracta a un ángulo θ_2 , llamado ángulo de refracción, a medida que pasa a través de la interfaz. El ángulo θ_1 también es igual al ángulo en el que el haz se refleja especularmente desde la superficie. Los ángulos θ_1 y θ_2 no son iguales cuando la densidad del plano es diferente de la del medio a través del cual viaja la radiación. Además, la refracción causa que el haz transmitido se desvíe hacia la perpendicular a la superficie de más alta densidad. Los dos ángulos están relacionados por la ley de Snell:

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (3.43)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción y n es la relación del índice de refracción para los dos medios de formación de la interfaz. El índice de refracción es el factor determinante para las pérdidas por reflexión en la interfase. Un valor típico de la refracción índice es 1.000 para el aire, 1.526 para el vidrio y 1.33 para el agua.

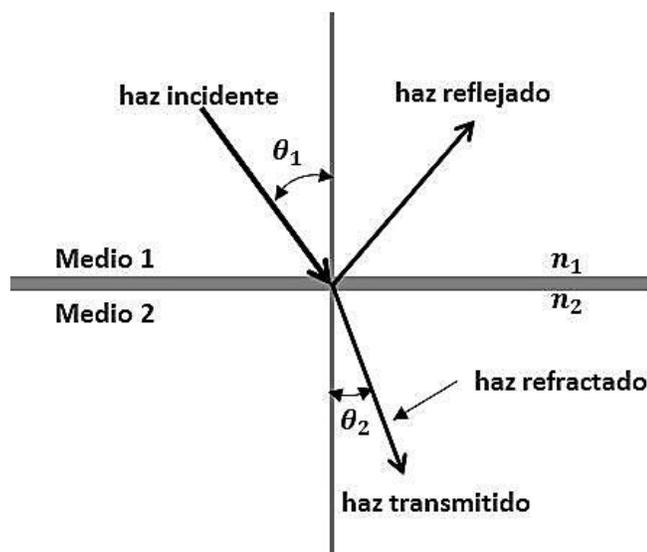


Figura 3-6 Ángulos de incidencia y refracción del haz al cruce de un medio con índice de refracción n_1 a un medio con índice de refracción n_2

Fresnel (1827) derivó las expresiones para las componentes perpendiculares y paralelas de la radiación incidente en superficies lisas como:

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (3.44)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (3.45)$$

La ecuación 3.44 representa la componente perpendicular de la radiación no polarizada, y la ecuación 3.45 representa la componente paralela. Cabe señalar que ambas componentes se refieren al plano definido por el haz incidente y la superficie normal.

Del mismo modo, la transmitancia, τ_r (el subíndice r indica que sólo se consideran las pérdidas por reflexión), se puede calcular a partir de la transmitancia media de los dos componentes de la siguiente manera:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \right) \quad (3.46)$$

La transmitancia, τ_{α} (el subíndice α indica que sólo se consideran las pérdidas por absorción), y puede calcularse a partir de:

$$\tau_{\alpha} = e^{\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2} \right)} \quad (3.47)$$

Donde K es el coeficiente de extinción, que puede variar de 4 m^{-1} (de baja calidad vidrio) a 32 m^{-1} (para el vidrio de alta calidad), y L es el espesor de la cubierta de vidrio.

Por lo tanto, la transmitancia de una sola cubierta se estima de la siguiente forma:

$$\tau \cong \tau_{\alpha} \tau_r \quad (3.48)$$

La transmitancia apropiada puede entonces obtenerse a partir de la ecuación 3.48, mientras que la absorbancia dependiente del ángulo de incidencia se puede conseguir a partir de (Beckman, 1977):

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_n (1 + 2.0345 \times 10^{-3} \bar{\theta} - 1.990 \times 10^{-4} \bar{\theta}^2 + 5.324 \times 10^{-6} \bar{\theta}^3 - 4.799 \times 10^{-8} \bar{\theta}^4) \quad (3.49)$$

Dónde $\bar{\theta}$ toma los valores de los ángulos de incidencia de la radiación directa, difusa y la reflejada por el suelo, y $\bar{\alpha}_n$ el valor dependiente al tipo de radiación, para el cálculo del correspondiente coeficiente de absorción, $\bar{\alpha}$.

El coeficiente de pérdida de calor total, U_{tot} , es una función del tipo de construcción del colector y sus condiciones de funcionamiento, y se compone de la suma de pérdidas de calor por: la cubierta, U_c , y el suelo, U_{gr} , (figura 3-7), está dado por la siguiente expresión:

$$U_{tot} = U_c + U_{gr} \quad (3.50)$$

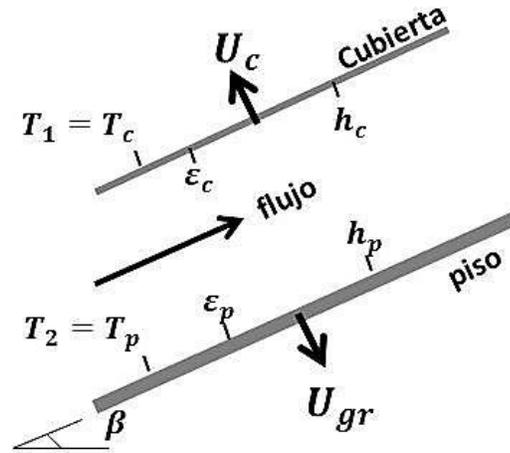


Figura 3-7 Esquema del sistema de colector con los parámetros correspondientes empleados

El coeficiente de pérdida de calor por la cubierta, U_c , se calcula

$$U_c = \frac{q_c}{T_p - T_a} \quad (3.51)$$

donde

$$q_c = \frac{T_p - T_a}{Nc^{-1} \left(\frac{T_p - T_a}{N + ff} \right)^{-0.25} + h_w^{-1}} + \frac{\sigma(T_p^4 - T_a^4)}{\epsilon_p^{-1} + \frac{2N + ff - 1}{\epsilon_p} - N} \quad (3.52)$$

$$c = 1.2529 - 0.00651\beta + 0.0000267\beta^2 \quad (3.53)$$

$$ff = 0.76 - 0.118 V_w + 0.0066 V_w^2 \quad (3.54)$$

$$h_w = 2.8 + 3.0 V_w \quad (3.55)$$

El coeficiente de pérdida de calor por el suelo, U_{gr} , se calcula a partir de

$$U_{gr} = 2 \left(\frac{k \rho_{gr} c_p}{\pi \tau} \right)^{0.5} \quad (3.56)$$

La simulación del estado periódico e inestable para el caso de almacenamiento y recuperación de calor debido a la intermitente transferencia de calor hacia y desde el suelo está más allá de la capacidad de un modelo de simulación con un promedio diario mensual. Este aspecto ha sido tratado por (Haaf W. , 1984), (Haaf W. F., 1983) y (Bernardes, 2003). Ellos muestran que el almacenamiento, recuperación y ejecución de

calor en el sistema después de la puesta del sol, puede ser un aspecto ventajoso de la energía solar en sistemas de chimenea si se implementa un diseño adecuado.

Los coeficientes de convección, h_c y h_p , para la cubierta y el piso respectivamente, son difíciles de determinar debido a la falta de correlaciones adecuadas para placas y canales inclinados. En los modelos publicados en la literatura para sistemas de colectores solares de chimenea, la cubierta y el suelo son considerados como placas horizontales (por ejemplo, (Pasumarthi, 1998); (Bernardes, 2003)), y se utilizan correlaciones apropiadas. En un sentido estricto, la cubierta no es horizontal, sino inclinada, pero puesto que el colector se analiza por segmentos en la dirección radial, es una aproximación justificada.

Utilizando la misma técnica y asumiendo la simplificación de forma geometría similar de placa paralela en cada segmento del colector. Así, la correlación de (Churchill, 1975) para placas en posición vertical con un número de Rayleigh modificado, $R_a \cos \beta$ puede utilizarse para estimar h_c en la superficie caliente inferior de la cubierta inclinada. Para la superficie caliente superior del suelo, no se recomienda una aproximación parecida debido a las inestabilidades, pero otras relaciones empíricas sí [(Fujii, 1972); (Azevedo, 1985)]. Si asumimos que el sistema de colectores es más como una de configuración de canal abierto, la relación empírica obtenida por ambos lados de los canales inclinados con calefacción por (Azevedo, 1985) también se puede utilizar.

$$N_u = 0.645 \left(\frac{S}{L} Ra_s \right)^{\frac{1}{4}} \quad 0 < \beta' < 45 \quad \left(\frac{S}{L} Ra_s \right) > 2 \times 10^2 \quad (3.57)$$

$$Ra_s = \frac{g \beta' (T - T_i) S^3}{\alpha \nu} \quad (3.58)$$

$$\beta' = \frac{1}{T_{fm}} \quad (3.59)$$

Las ecuaciones 3.57 a 3.59 son la combinación de una correlación de resultados de transferencia de calor para diversos modos de calefacción, inclinaciones, espaciamentos interplacas y números de Rayleigh modificados, es decir, insensible a la inclinación y modo de calentamiento. Las correlaciones de Churchill, McAdams (McAdams, 1954), Fujii y Imura, que son utilizados por Pasumarthi y Sherif y Bernardes (Pasumarthi, 1998), así como la ecuación 3.57, encontraron que las diferencias en los números de Nusselt eran pequeñas, que tenía un efecto insignificante en la simulación los resultados finales.

El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre dos placas paralelas es

$$h_r = \frac{\sigma (T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\epsilon_p^{-1} + \epsilon_c^{-1} - 1} \quad (3.60)$$

Los factores de eficiencia del colector, del flujo y en la extracción de calor, respectivamente son

$$F' = \frac{h_r h_p + h_p U_c + h_c h_r + h_p h_c}{((U_c + h_r) + h_c)(U_{gr} + h_p + h_r) - h_r^2} \quad (3.61)$$

$$F'' = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_{tot} F'} \left(1 - \exp\left(\frac{-A_c U_{tot} F'}{\dot{m} c_p}\right) \right) \quad (3.62)$$

$$F_R = F' F'' \quad (3.63)$$

El calor útil captado, Q_u , el flujo de calor, q_u , y la eficiencia térmica del colector solar, η_{col} , son

$$\bar{Q}_u = A_c F_R (\bar{S} - U_{tot} (T_i - T_a)) \quad (3.64)$$

$$\bar{q}_u = F_R (\bar{S} - U_{tot} (T_i - T_a)) \quad (3.65)$$

$$\eta_{col} = \frac{\bar{q}_u}{\bar{H}_T} \quad (3.66)$$

3.4.5 Chimenea cilíndrica (convencional)

La presión desarrollada debido a la diferencia de densidad del aire a la entrada a una temperatura T_{2chi} , y a la salida a una temperatura T_{1chi} en la chimenea se calcula como

$$\Delta P = \int_{1chi}^{2chi} g (\rho_1 - \rho(z)) dz \quad (3.67)$$

Para una chimenea adiabática vertical, mediante la integración de la ecuación (3.67) entre la entrada a la temperatura T_{2chi} , y la salida en T_{1chi} , obtenemos

$$\Delta P_{chi} = (\rho_1 - \rho_2) g H_{chi} \quad (3.68)$$

Suponiendo que la variación de la densidad del aire es lineal entre la entrada y la salida del colector inclinado. Esta hipótesis se justifica por ΔT entre la temperatura del aire a la entrada y a la salida del colector, es pequeña, alrededor de 10 a 15 K, y el radio del colector, la longitud del colector y la altura de la chimenea se determina de tal manera que el calor solar se recoge a lo largo de la dirección radial, permite tener parámetros térmicos cuasi-lineales (Haaf W. F., 1983) (Bernardes, 2003). Esto se consigue por hora de simulación. Por lo tanto, la variación de la densidad del aire puede ser expresado como

$$\rho(z) = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{H_{col}} z \quad (3.69)$$

Mediante la integración de la ecuación (3.67) entre la entrada y salida del colector inclinado con $\rho(z)$ de la ecuación (3.69), obtenemos la diferencia de presión creada en el colector

$$\Delta P_{col} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{2} g H_{col} \quad (3.70)$$

Por tanto, la presión total debida a la flotabilidad es

$$\Delta P_{tot} = (\rho_1 - \rho_2) g \left(h_{chi} + \frac{H_{col}}{2} \right) \quad (3.71)$$

La diferencia de presión total generada se invierte, en parte, en las pérdidas por fricción en el colector y la chimenea, ΔP_f , en las pérdidas de energía cinética en la salida de la chimenea, ΔP_{KE} , y el resto es utilizado por la turbina, ΔP_{turb} . Por lo tanto,

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_f + \Delta P_{KE} + \Delta P_{turb} \quad (3.72)$$

donde

$$\Delta P_f = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.73)$$

y

$$\Delta P_{KE} = \frac{1}{2} \rho V_{chi}^2 \quad (3.74)$$

3.4.6 Eficiencia global térmica y de energía

La energía generada por la turbina, P_{turb} , y la eficiencia global térmica, η , respectivamente, son

$$P_{turb} = \eta_t \Delta P_{turb} V_{chi} A_{chi} \quad (3.75)$$

$$\eta = \frac{C P_{turb}}{\bar{H}_T} \quad (3.76)$$

donde $C = (s / \text{día})$ es la duración de la producción de energía en un determinado día promedio mensual.

3.4.7 Algoritmo de solución para el modelado matemático del colector inclinado y chimenea cilíndrica

El algoritmo supone que la temperatura exterior y la temperatura del aire fluyendo en el colector son uniformes y varían linealmente a lo largo del colector. De este modo, el colector se divide en segmentos cortos iguales, y los parámetros determinados por los cálculos en el segmento anterior son utilizado como datos en la entrada del siguiente segmento. Esta técnica también es utilizada por Pasumarthi y Sherif (Pasumarthi, 1998) y Bernardes (Bernardes, 2003). El proceso iterativo se resume a continuación:

- Leer ubicación geográfica (latitud, longitud, altitud), datos del colector (pendiente, número de cubiertas, dimensiones), las propiedades del material de cubierta, características ópticas del campo. Leer los datos meteorológicos (radiación media diaria mensual sobre una superficie horizontal, la temperatura y velocidad del viento).
- Calcular los ángulos de incidencia promedio mensual para las radiaciones difusa y reflejada, y el promedio mensual de los coeficientes de reflexión, transmisión y absorción para estos ángulos de incidencia.
- Calcular la posición promedio mensual del sol al mediodía, el ángulo horario de puesta del sol y el ángulo de incidencia del haz de radiación directa. Calcular los coeficientes medios mensuales de reflexión, transmisión y absorción del haz de radiación.
- Calcular la radiación extraterrestre promedio mensual, el índice de claridad y radiación total promedio mensual en el colector.
- Para una temperatura conocida de entrada del aire, los valores iniciales de entrada para la temperatura de la cubierta, T_c , la temperatura del fluido, T_f , temperatura media del fluido, T_{fm} , y la temperatura del absorbedor, T_p .
- Valor inicial a la entrada para la tasa de flujo de masa de aire, \dot{m} .
- Iteración de lazo (para determinar por iteración \dot{m} , T_f , T_c y T_p).
- Calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección del viento, en el colector, y el coeficiente global, U_c , U_{gr} , y U_{tot} .
- Calcular F' , F'' , F_R y la energía útil, \bar{Q}_u .
- Calcular \dot{m} usando la velocidad del aire en la chimenea (o utilizando \bar{Q}_u).
- Calcular T_f , T_{fm} y T_p durante el cual se hará uso de dos relaciones, una basada en \bar{Q}_u y la otra en T_{fm} y T_i para calcular T_f .
- Comprobar si $|T_f(i) - T_f(i - 1)| < 0.1$; si no se repite el cálculo a partir de la iteración del bucle.
- Calcular la potencia y la energía producida mensualmente y otros parámetros.

3.4.8 Código y validación

Se realizó un programa de cálculo, y para asegurar que el algoritmo de la radiación y los cálculos de transmisión producen resultados correctos, el código fue validado utilizando varios ejemplos en la literatura (por ejemplo, (Kalogirou, Solar energy engineering : processes and systems, 2009) en cada paso de los cálculos de los parámetros importantes como \bar{H}_T y \bar{S} , se obtuvo concordancia del 2 al 3% para pendientes de cero a 90°. Fue muy difícil una validación utilizando una planta de energía solar de chimenea debido a la falta de datos diarios medios mensuales en la literatura. Sin embargo, se utilizaron los resultados publicados del prototipo de Manzanares, que tenían un campo de colectores horizontales, una chimenea y una turbina (Haaf W. , 1984).

3.5 Chimenea convergente (propuesta)

Walter Z. y Sergio A. (Walter Z., 1984) investigaron sobre el diseño, la construcción y prueba de la variación de la geometría de la chimenea para un sistema de secador solar, los resultados indicaron que una ligera modificación de la geometría en la chimenea (convertirla en cono manteniendo constante la altura) incrementa la velocidad del aire con un factor 2- 3 con respecto a una chimenea de forma cilíndrica.

H. H. Al-Kayiem y Q. A. Al-Nakeeb (H. H. Al-Kayiem, 2013) consideraron el efecto de variar la configuración de la chimenea en el rendimiento del sistema. A continuación se presenta el análisis en la variación de la configuración de la chimenea.

3.5.1 Ecuaciones que rigen el flujo

Se representa matemáticamente el flujo en el sistema mediante la aplicación de las ecuaciones del movimiento y la ecuación de estado para resolver cuatro incógnitas en cada punto en el sistema, a saber, la velocidad, la densidad, presión y temperatura. El análisis se llevó a cabo en la parte de la chimenea, como se muestra en la figura 3-8, mediante la resolución de las ecuaciones que rigen con las suposiciones adecuadas en cada parte.

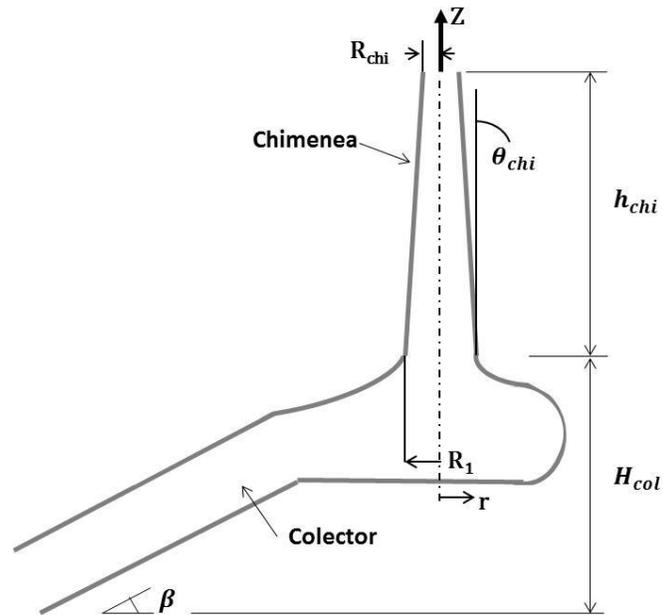


Figura 3-8 Vista de la sección de la chimenea convergente

Para hacer la formulación general adecuada para la transferencia de calor y el mecanismo de flujo de aire, se consideran los siguientes supuestos:

- El sistema es estable:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

- No hay un componente de la velocidad en dirección θ , y el flujo de la chimenea tiene una simetría completa con respecto a la dirección θ , por lo que:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$$

- La variación de la temperatura es pequeña, por lo que la conductividad térmica del aire y la viscosidad son constantes.

- El flujo se somete a la transferencia de calor desde la pared de la chimenea.

- Entonces el efecto de compresibilidad se considera mínimo:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} > 0.05$$

En consecuencia, el conjunto de las ecuaciones generales se convierte en:

La continuidad

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial z} V_z = 0 \quad (3.77)$$

El momentum

$$\rho V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} - \rho g \beta (T - T_a) + \frac{\partial p}{\partial z} - \mu \left[\frac{4}{3} \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right] = 0 \quad (3.78)$$

La energía

$$k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left[\frac{2}{3} \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2 \right] - C_p \left(p V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + V_z \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3.79)$$

Donde V_z es la componente de velocidad del flujo ascendente en la chimenea. T y p son la temperatura y la presión, respectivamente, en cualquier punto en el campo de flujo, ρ es la densidad del aire en cualquier punto en el campo de flujo.

Los coeficientes μ y k deben ser considerados para flujo laminar ó flujo turbulento. Si el flujo de aire es laminar, los valores de μ y k son propiedades físicas del fluido. Si el flujo es turbulento, entonces los valores de μ y k por el transporte del momentum y la energía son función de la temperatura y el flujo del aire. El flujo turbulento da lugar a valores efectivos de la viscosidad y la conductividad térmica y se define como la viscosidad vórtice, ε , y la conductividad térmica, k , respectivamente. Los valores de viscosidad y la conductividad térmica en flujo turbulento consisten en $(\mu + \varepsilon)$ y $(k + \kappa)$, (Schlichting, 1979), donde:

$$\varepsilon = \rho l^2 \left| \frac{\partial v_r}{\partial r} \right| \quad (3.80)$$

$$k = \varepsilon C_p \quad (3.81)$$

Donde se llama l a la longitud de mezcla que podría evaluarse para el flujo entre dos placas separadas por $2R$ de acuerdo con (Schlichting, 1979), (R es la distancia desde la pared a la distancia media entre las placas), por tanto, el análisis del campo de flujo turbulento a través de la chimenea se obtiene:

$$\frac{1}{R} = \left[0.14 - 0.08 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 0.06 \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right] \quad (3.82)$$

La temperatura de la pared de la chimenea se puede calcular mediante la aplicación de la ecuación:

$$T_w = \frac{T_a + \alpha I}{h_w} \quad (3.83)$$

La temperatura de la pared, T_w , es la temperatura ambiente incrementada en una cantidad teniendo en cuenta la radiación solar, (F. W. Stoecker, 1982).

La eficiencia de la conversión de energía térmica en flujo para la potencia disponible en la chimenea, η_{th} , es:

$$\eta_{th} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V^3}{C_p \dot{m} \Delta T} \quad (3.84)$$

3.5.2 Análisis de la chimenea

El rendimiento de la chimenea se analiza en varias configuraciones de diseño, diseño convencional, $\theta_{chi} = 0^\circ$, es decir, como un tubo y como escenario de convergencia (boquilla), $\theta_{chi} < 0^\circ$, como se muestran en la figura 3-9.

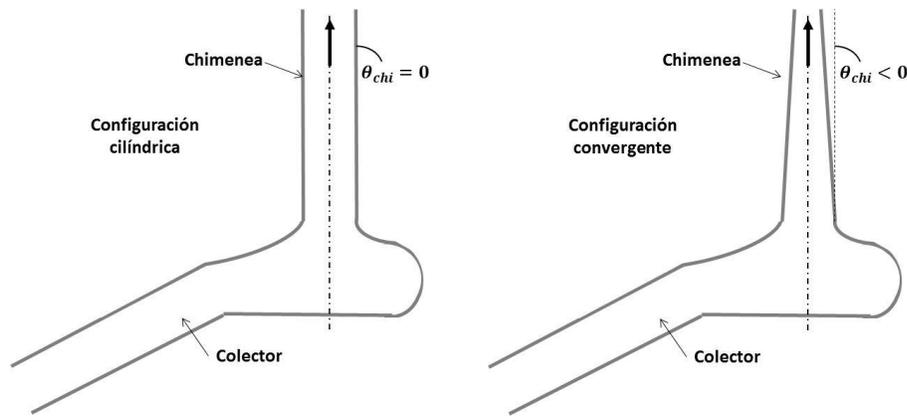


Figura 3-9 Configuraciones simuladas de la chimenea

Capítulo 4: Resultados y Conclusiones

El estudio se llevó a cabo para el sistema convencional y el propuesto en igualdad de circunstancias considerando las condiciones geográficas y meteorológicas de la ciudad de Morelia, Michoacán.

4.1 Resultados

Para lograr resultados comparativos entre los dos sistemas, el dimensionado fue considerando la misma superficie de captación, con la forma geométrica de cada uno, la misma altura y sección transversal en la chimenea, sólo en el caso de la chimenea convergente propuesta, se varió uniformemente la sección transversal hasta la salida, respetando el mismo diámetro a la entrada.

Las dimensiones de cada sistema se muestran en la tabla 4-1 según la nomenclatura indicada en las figuras 3-3 para el convencional y en la figura 3-4 para el propuesto.

Tabla 4-1 Dimensionamiento de los sistemas para el modelado

| SISTEMA CONVENCIONAL | | SISTEMA PROPUESTO | |
|--|-----------|---|-----------|
| Radio chimenea, r_{chi} , m | 5.08 | Base colector, a , m | 305.81 |
| Radio colector, r_{col} , m | 122.00 | Altura colector, h , m | 305.81 |
| Altura entre la cubierta y el suelo, h_{col} , m | 1.85 | Altura entre la cubierta y el suelo, h_{col} , m | 1.85 |
| Altura de la chimenea, h_{chi} , m | 194.60 | Altura de la chimenea, h_{chi} , m | 194.60 |
| | | Altura vertical del colector inclinado, H_{col} , m | 79.00 |
| | | Diámetro entrada chimenea, D_{3chi} , m | 10.16 |
| | | Diámetro salida chimenea, D_{4chi} , m | 8.16 |
| Área total de colector, m^2 | 46,759.47 | Área total de colector, m^2 | 46,759.47 |

Los datos meteorológicos necesarios para el estudio se obtuvieron según recomendación de la referencia (Kalogirou, 2009), en <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse>, mediante la introducción de la longitud y latitud de la ubicación encontrado en www.infoplease.com/atlas/latitud-longitude.html, también recomendada en la misma literatura.

En la tabla 4-2 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de la radiación total incidente sobre una superficie inclinada variando el ángulo de inclinación desde 0° a 90° con respecto a la horizontal, en intervalos de 15° .

Tabla 4-2 Cálculo de la radiación total incidente sobre una superficie inclinada (MJ/m^2 día)

| Mes | $\bar{H}_{tot}; \beta = 0$ | $\bar{H}_{tot}; \beta = 15$ | $\bar{H}_{tot}; \beta = 30$ | $\bar{H}_{tot}; \beta = 45$ | $\bar{H}_{tot}; \beta = 60$ | $\bar{H}_{tot}; \beta = 75$ | $\bar{H}_{tot}; \beta = 90$ |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Enero | 20.088 | 24.53 | 27.73 | 29.49 | 29.76 | 28.79 | 0.00 |
| Febrero | 20.088 | 22.69 | 24.07 | 24.15 | 22.93 | 20.58 | 17.55 |
| Marzo | 20.088 | 22.47 | 23.68 | 23.64 | 22.38 | 20.05 | 17.07 |
| Abril | 20.088 | 19.82 | 18.55 | 16.38 | 13.44 | 9.99 | 6.35 |
| Mayo | 20.088 | 18.99 | 17.04 | 14.35 | 11.16 | 7.77 | 4.97 |
| Junio | 20.088 | 18.64 | 16.40 | 13.52 | 10.25 | 6.98 | 0.00 |
| Julio | 20.088 | 18.82 | 16.72 | 13.94 | 10.71 | 7.37 | 0.00 |
| Agosto | 20.088 | 19.51 | 17.98 | 15.60 | 12.55 | 9.08 | 5.65 |
| Septiembre | 20.088 | 20.63 | 20.08 | 18.46 | 15.91 | 12.57 | 8.70 |
| Octubre | 20.088 | 22.18 | 23.08 | 22.71 | 21.12 | 18.46 | 15.05 |
| Noviembre | 20.088 | 24.05 | 26.77 | 28.08 | 27.94 | 26.56 | 25.07 |
| Diciembre | 20.088 | 25.25 | 29.18 | 31.62 | 32.51 | 32.16 | 0.00 |
| promedio | 20.09 | 21.46 | 21.77 | 20.99 | 19.22 | 16.70 | 8.37 |

En la figura 4-1 se muestra el comportamiento de la radiación total anual promedio mensual que incide sobre la superficie inclinada a los diferentes ángulos.

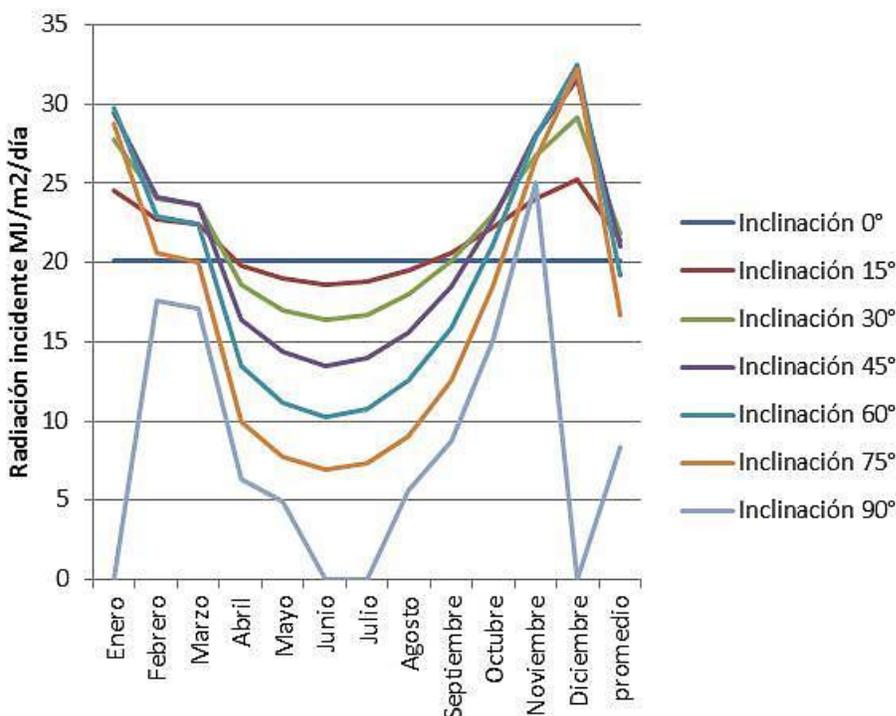


Figura 4-1 Radiación total promedio mensual sobre superficie inclinada en Morelia

Al graficar el promedio anual de la radiación total incidente sobre la superficie inclinada, figura 4-2, se aprecia que con un ángulo de inclinación fijo de 30° incide la mayor radiación sobre la superficie durante todo el año.

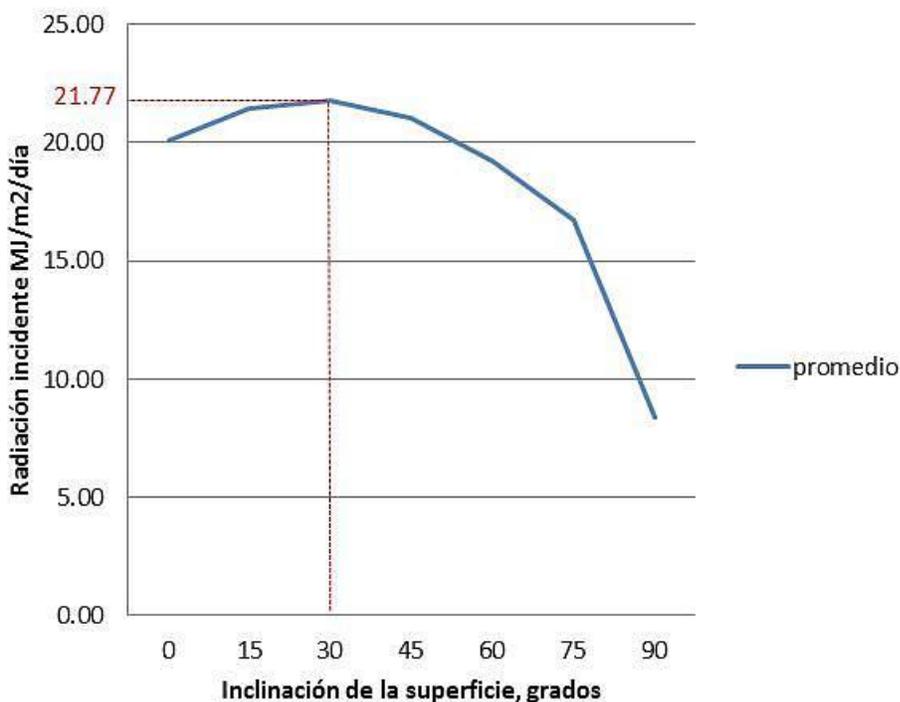


Figura 4-2 Radiación total promedio anual sobre superficie inclinada en Morelia

Se determinó que con un ángulo de inclinación de 30° en el colector la radiación total diaria promedio mensual se incrementa 6.82% con respecto a una superficie horizontal.

El ángulo de incidencia de la radiación difusa y de la radiación reflejada por el suelo sobre la superficie inclinada varía con el ángulo de inclinación, figura 4-3. El promedio hora por hora mensual del ángulo de incidencia de la radiación difusa, $\bar{\theta}_d$ es 58°, y de la radiación reflejada por el suelo, $\bar{\theta}_g$ es 71°.

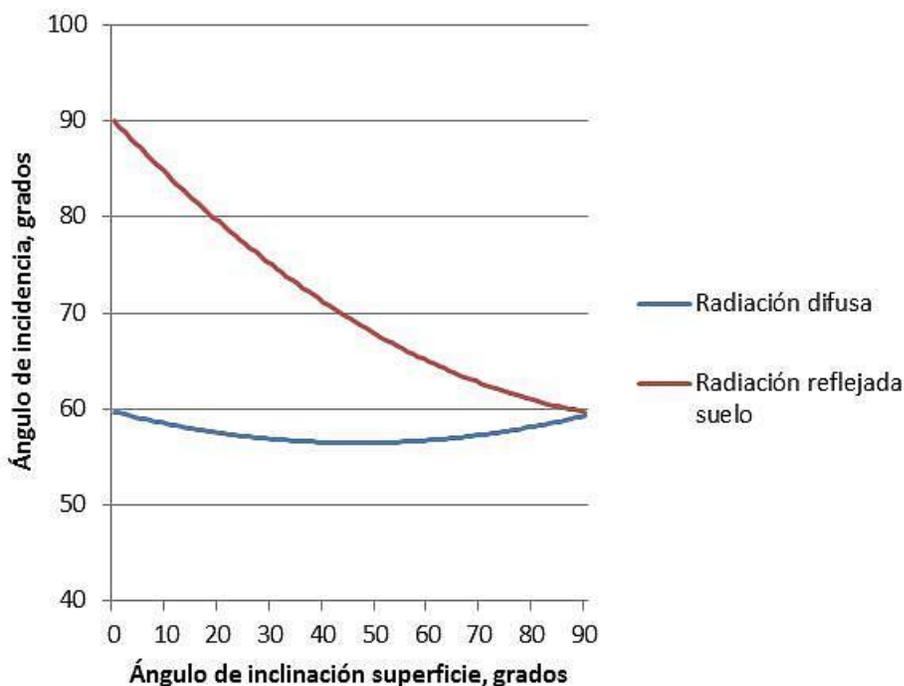


Figura 4-3 Ángulo de incidencia de la radiación difusa y reflejada del suelo variando ángulo de inclinación de la superficie

La absorptancia es dependiente del ángulo de incidencia, según la ecuación 3.49, $\bar{\theta}$ toma los valores de los ángulos de incidencia de la radiación directa, difusa y la reflejada por el suelo, con: $\bar{\theta}_d = 58^\circ$, y $\bar{\theta}_g = 71^\circ$, el coeficiente de absorción $\bar{\alpha}$ del colector para las radiaciones difusa y reflejada por el suelo son, respectivamente: $\bar{\alpha}_d = 0.615229163$ y $\bar{\alpha}_g = 0.535235276$.

En la tabla 4-3 se muestra el comportamiento del promedio mensual del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie inclinada variando el ángulo de inclinación desde 0° a 90° con respecto a la horizontal, en intervalos de 15° .

La figura 4-4 muestra gráficamente el comportamiento del promedio mensual del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre la superficie inclinada a los diferentes ángulos de inclinación.

Tabla 4-3 Promedio mensual del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie inclinada variando el ángulo de inclinación, grados

| $\bar{\theta}_b$ | $\beta = 0^\circ$ | $\beta = 15^\circ$ | $\beta = 30^\circ$ | $\beta = 45^\circ$ | $\beta = 60^\circ$ | $\beta = 75^\circ$ | $\beta = 90^\circ$ |
|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| enero | 40.68 | 25.68 | 10.68 | 4.32 | 19.32 | 34.32 | 49.32 |
| febrero | 32.72 | 17.72 | 2.72 | 12.28 | 27.28 | 42.28 | 57.28 |
| marzo | 21.78 | 6.78 | 8.22 | 23.22 | 38.22 | 53.22 | 68.22 |
| abril | 9.98 | 5.02 | 20.02 | 35.02 | 50.02 | 65.02 | 80.02 |
| mayo | 0.74 | 14.26 | 29.26 | 44.26 | 59.26 | 74.26 | 89.26 |
| junio | 3.39 | 18.39 | 33.39 | 48.39 | 63.39 | 78.39 | 93.39 |
| julio | 1.24 | 16.24 | 31.24 | 46.24 | 61.24 | 76.24 | 91.24 |
| agosto | 6.65 | 8.35 | 23.35 | 38.35 | 53.35 | 68.35 | 83.35 |
| septiembre | 17.95 | 2.95 | 12.05 | 27.05 | 42.05 | 57.05 | 72.05 |
| octubre | 29.73 | 14.73 | 0.27 | 15.27 | 30.27 | 45.27 | 60.27 |
| noviembre | 38.92 | 23.92 | 8.92 | 6.08 | 21.08 | 36.08 | 51.08 |
| diciembre | 42.89 | 27.89 | 12.89 | 2.11 | 17.11 | 32.11 | 47.11 |
| Promedio | 20.56 | 15.16 | 16.08 | 25.21 | 40.21 | 55.21 | 70.21 |

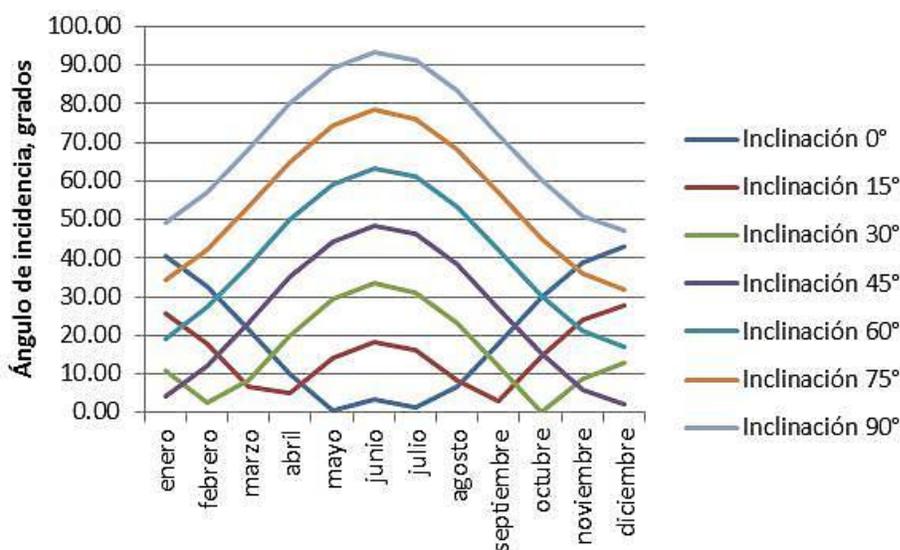


Figura 4-4 Promedio mensual del ángulo de incidencia de la radiación directa variando ángulo de inclinación de la superficie

En la figura 4-5 se puede apreciar que el menor ángulo de incidencia de la radiación directa sobre la superficie inclinada se presenta con una inclinación de 15° en la superficie inclinada, que es con el cual incidirá la mayor radiación directa sobre el colector en ésta ubicación.

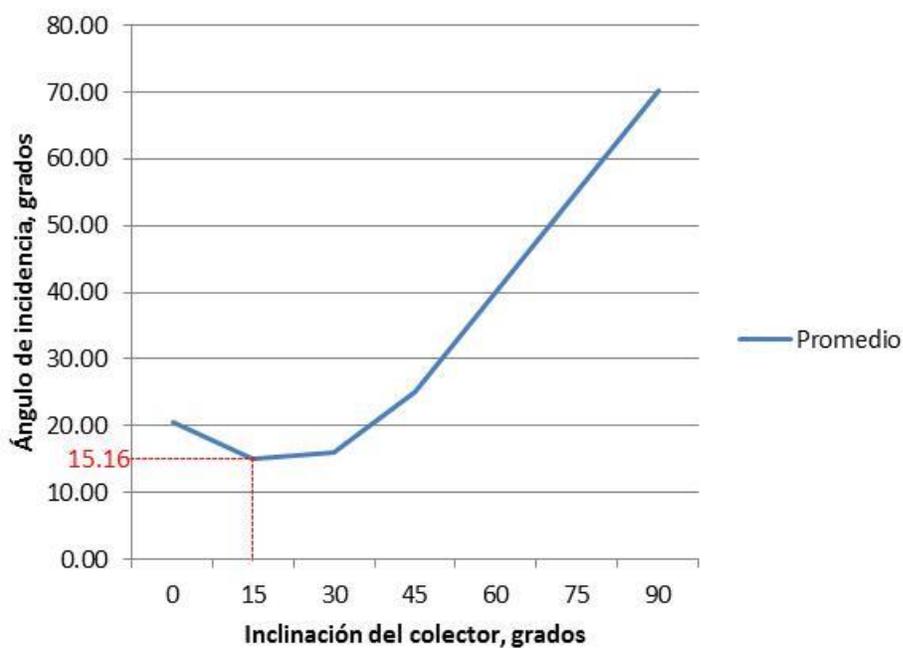


Figura 4-5 Promedio anual del ángulo de incidencia de la radiación directa variando ángulo de inclinación de la superficie

Una vez determinadas las tres componentes de la energía solar que incide en la superficie inclinada: la radiación directa, la radiación difusa, y la radiación reflejada por el suelo (albedo), se puede determinar la radiación media mensual absorbida por el colector, \bar{S} , multiplicando cada término con el producto transmitancia - absorbancia correspondiente, la tabla 4-4 muestra los resultados obtenidos:

Tabla 4-4 Promedio mensual de la radiación total absorbida por el colector variando el ángulo de inclinación, (MJ/m^2 día)

| Mes | $\bar{S}; \beta = 0$ | $\bar{S}; \beta = 15$ | $\bar{S}; \beta = 30$ | $\bar{S}; \beta = 45$ | $\bar{S}; \beta = 60$ | $\bar{S}; \beta = 75$ | $\bar{S}; \beta = 90$ |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Enero | 13.06 | 18.28 | 24.07 | 27.41 | 27.12 | 25.83 | 0.00 |
| Febrero | 13.99 | 15.69 | 18.74 | 19.36 | 16.07 | 14.85 | 9.84 |
| Marzo | 14.68 | 13.53 | 14.75 | 13.79 | 9.37 | 9.41 | 5.36 |
| Abril | 15.16 | 11.93 | 12.13 | 10.79 | 6.25 | 7.85 | 5.05 |
| Mayo | 15.28 | 10.95 | 10.80 | 9.37 | 5.10 | 7.72 | 5.24 |
| Junio | 15.32 | 10.55 | 10.14 | 8.85 | 4.79 | 7.73 | 0.00 |
| Julio | 15.28 | 10.76 | 10.41 | 9.09 | 4.93 | 7.69 | 0.00 |
| Agosto | 15.20 | 11.58 | 11.55 | 10.17 | 5.73 | 7.68 | 5.09 |
| Septiembre | 14.84 | 12.94 | 13.76 | 12.58 | 8.06 | 8.58 | 5.02 |
| Octubre | 14.20 | 15.01 | 17.35 | 17.41 | 13.64 | 12.68 | 7.77 |
| Noviembre | 13.30 | 17.59 | 22.62 | 25.15 | 23.91 | 22.45 | 18.74 |
| Diciembre | 12.64 | 19.34 | 26.26 | 30.89 | 32.25 | 31.36 | 0.00 |
| promedio | 14.41 | 14.01 | 16.05 | 16.24 | 13.10 | 13.65 | 5.18 |

La figura 4-6 muestra la radiación total absorbida promedio mensual por el colector a los diferentes ángulos de inclinación.

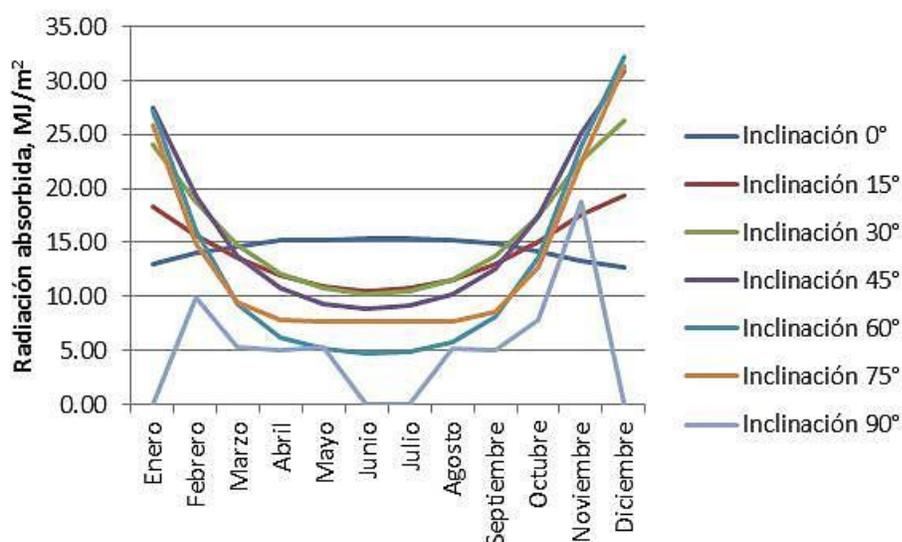


Figura 4-6 Radiación total absorbida por el colector promedio mensual variando ángulo de inclinación del colector

En la figura 4-7 se muestran los promedios anuales de la radiación total absorbida por el colector, donde se puede apreciar que con una inclinación de entre 30° y 45° el colector absorbe la mayor radiación total.

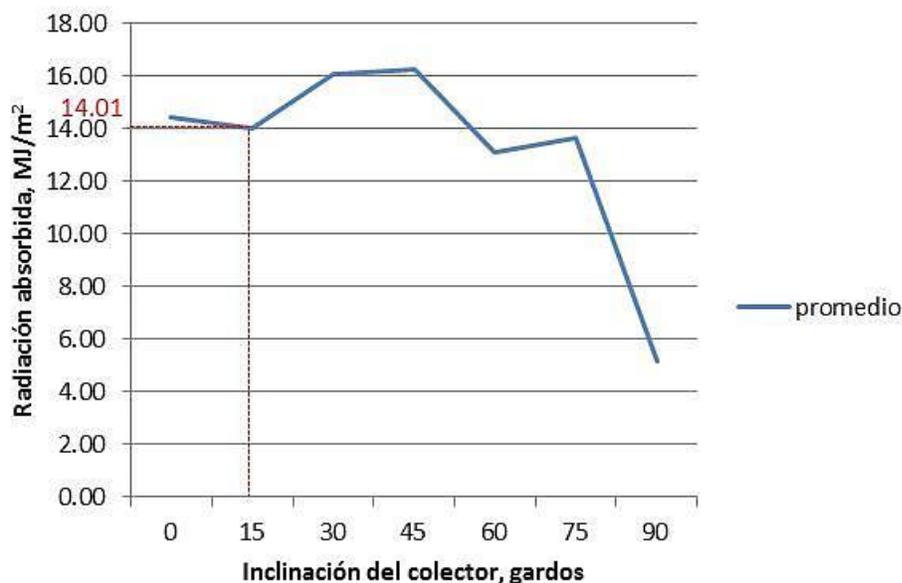


Figura 4-7 Radiación total absorbida por el colector promedio anual variando ángulo de inclinación del colector

Con 15° de inclinación en el colector, el ángulo de incidencia de la radiación directa es óptimo (mínimo), sin embargo, con un ángulo de inclinación de 30° a 45° la radiación solar anual promedio mensual absorbida se incrementa 11.38% y en el flujo de calor 49.75%. De acuerdo a la ley de Snell en su ecuación 3-43, la radiación que pasa a través de la cubierta del colector es mayor a medida que ésta incide normal en la superficie, las pérdidas ópticas por reflexión se minimizan, pero debido a que el ángulo de incidencia varía a cada instante por la incesante dinámica de la tierra respecto al sol, esto origina que la magnitud de esta radiación varíe de igual manera a lo largo de todo el año, como lo muestra la figura 4-6, sin embargo, la posición en la que en promedio anual la mayor cantidad de radiación traspasa la cubierta es a 15° de inclinación.

Sustituyendo los valores de las condiciones geográficas y meteorológicas de Morelia, Michoacán en el modelo matemático desarrollado para el sistema convencional de Manzanares, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4-5.

Tabla 4-5 Resultados del modelo matemático del sistema convencional con los datos geográficos y meteorológicos de Morelia, Michoacán

| | | Convencional Manzanares | Convencional Morelia |
|----------------------|------------------|---|---|
| Datos de entrada | °C | $T_1 = 18.5$ | $T_1 = 19.5$ |
| | Pa | $p_1 = 92930$ | $p_1 = 88877$ |
| | m/s | $V_1 = 1$ | $V_1 = 2.94$ |
| | W/m ² | $I = 1017$ | $I = 750$ |
| Resultados obtenidos | °C | $T_2 = 37.91$ | $T_2 = 24.61$ |
| | °C | $T_3 = 37.06$ | $T_3 = 24.64$ |
| | °C | $T_4 = 33.17$ | $T_4 = 22.75$ |
| | Pa | $p_2 = 92762$ | $p_2 = 87489$ |
| | Pa | $p_3 = 92794$ | $p_3 = 87519$ |
| | Pa | $p_4 = 90828$ | $p_4 = 86873$ |
| | Pa | $\Delta p_{tot} = p_1 - p_3 = 136$ | $\Delta p_{tot} = p_1 - p_3 = 1358$ |
| | Pa | $\Delta p_{turb} = x\Delta p_{tot} = 90.26$ | $\Delta p_{turb} = x\Delta p_{tot} = 905$ |
| | kW | $\dot{W}_{ext} = 48.38$ | $\dot{W}_{ext} = 129.31$ |

Los resultados de la tabla 4-5 muestran que éste es un emplazamiento adecuado, además que hay ventaja sobre la torre de Manzanares España, en relación al diferencial de presión total generado, y por lo tanto, en el diferencial de presión disponible para la turbina y la potencia que puede ser extraída por ésta hasta en 90%.

Considerando los resultados anteriores, se realizó simulación por análisis finito de los dos sistemas dimensionándolos según la tabla 4-1, con los datos meteorológicos de Morelia, Michoacán, y sometiéndolos a igualdad de condiciones.

En las figuras 4-8 y 4-9 se muestran los sistemas de malla realizados para la simulación de ambos sistemas.

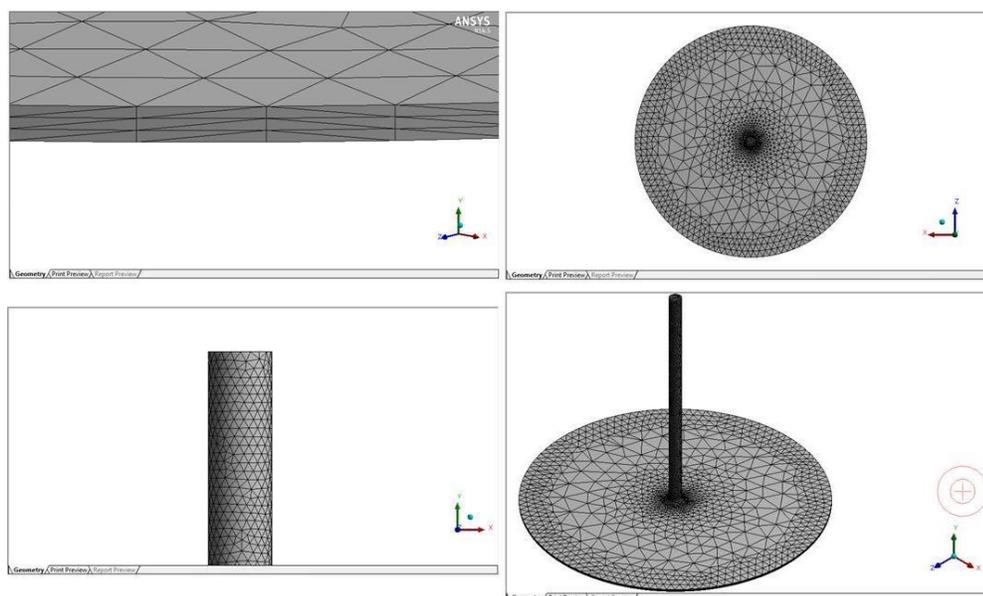


Figura 4-8 Mallado para análisis finito sistema de chimenea convencional

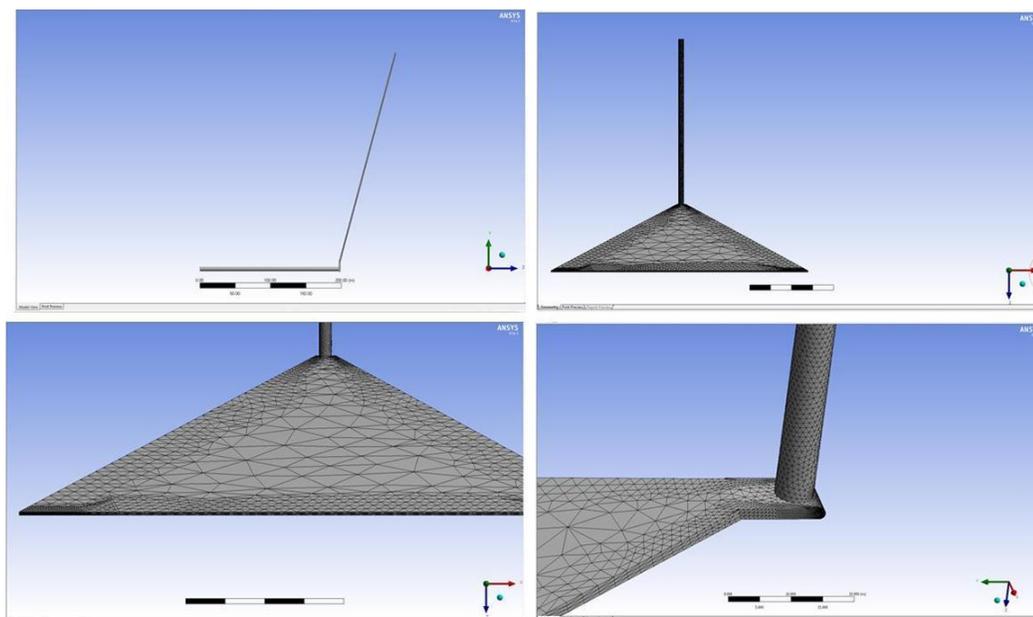


Figura 4-9 Mallado para análisis finito sistema de chimenea propuesto

En la figura 4-10 se muestra el perfil de temperaturas del sistema convencional, la temperatura máxima del fluido es de 56.89°C.

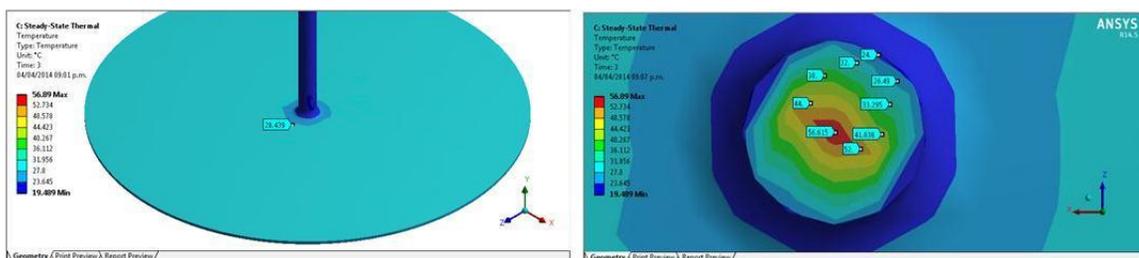


Figura 4-10 Perfil de temperaturas sistema de chimenea convencional

En la figura 4-11 se muestra el perfil de temperaturas del sistema propuesto, la temperatura máxima del fluido es de 58.62°C.

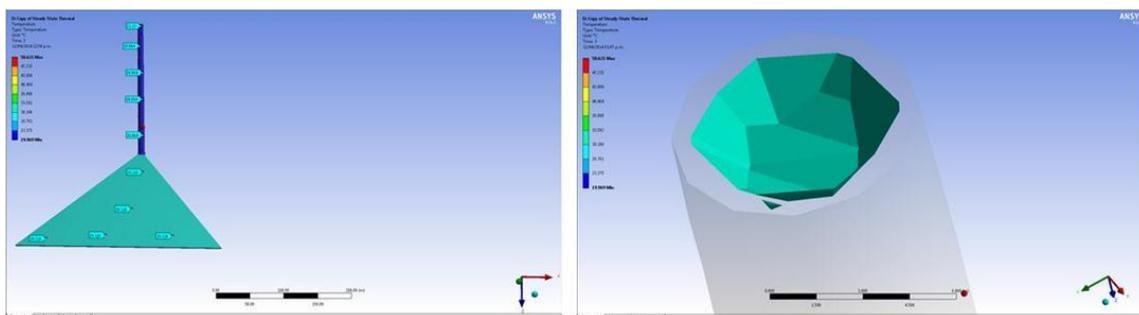


Figura 4-11 Perfil de temperaturas sistema de chimenea propuesto

En la figura 4-12 se muestra el perfil de presiones del sistema convencional, la presión máxima del fluido es de 3677 Pa.

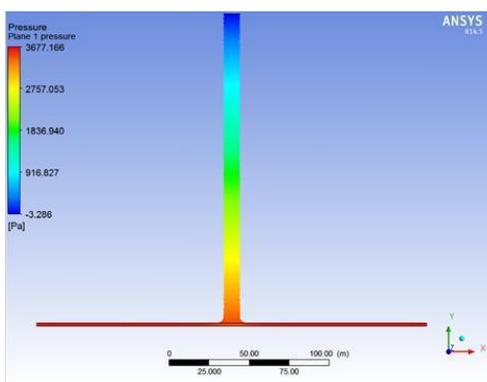


Figura 4-12 Perfil de presiones sistema de chimenea convencional

En la figura 4-13 se muestra el perfil de presiones del sistema propuesto, la presión máxima del fluido es de 7794 Pa.

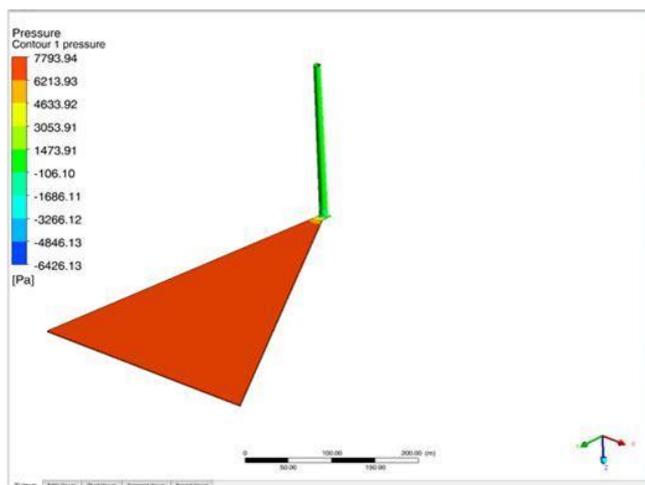


Figura 4-13 Perfil de presiones sistema de chimenea propuesto

En la figura 4-14 se muestra el perfil de velocidades del sistema convencional, la velocidad máxima del fluido es de 27.28 m/s.

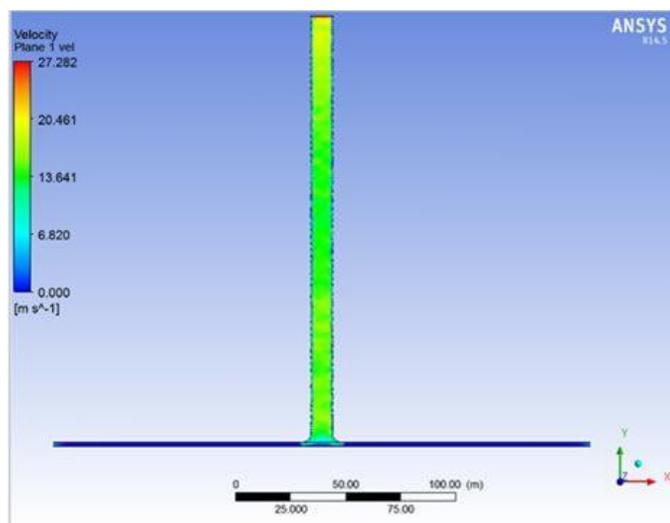


Figura 4-14 Perfil de velocidades sistema de chimenea convencional

En la figura 4-15 se muestra el perfil de velocidades del sistema propuesto, la velocidad máxima del fluido es de 129.41 m/s.

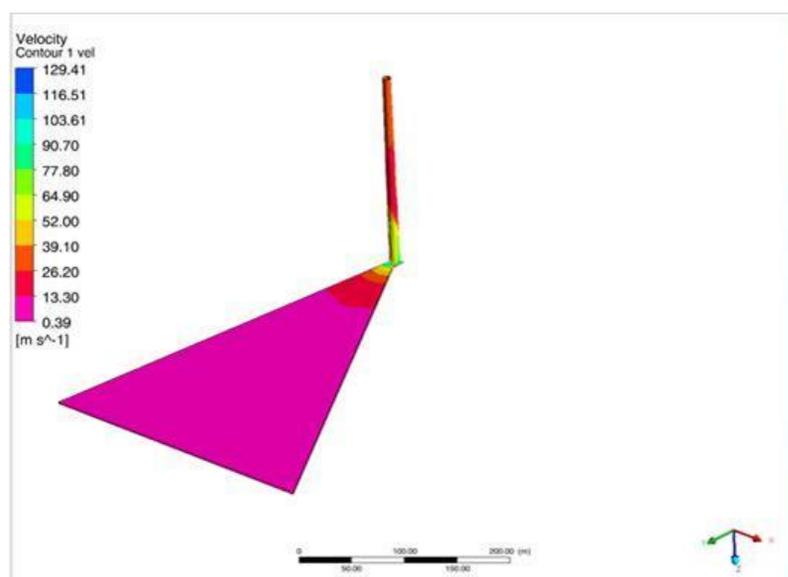


Figura 4-15 Perfil de velocidades sistema de chimenea propuesto

Los datos meteorológicos para la ciudad de Morelia, Michoacán utilizados para los cálculos se muestran en la tabla 4-6.

Tabla 4-6 Datos meteorológicos de la ciudad de Morelia, Michoacán

| | |
|---|----------|
| Temperatura ambiente, $T_a = T_1, ^\circ\text{C}$ | 19.5 |
| Velocidad del viento, $V_w = V_1, \text{m/s}$ | 2.94 |
| Presión atmosférica, p_1, Pa | 85200 |
| Irradiación solar, $I, \text{W/m}^2$ | 880 |
| Latitud, φ , grados | 19.768 |
| Longitud, grados | -101.189 |

Al realizar la simulación en software de elemento finito, con cambio en la geometría del colector a triangular convergente y en la chimenea a cilíndrica convergente, se tuvieron los resultados mostrados en la tabla 4-7: incremento de la velocidad del flujo a la salida del colector de 762%, incremento en la diferencia de presión total generada y la diferencia de presión disponible para ser extraída por la turbina de 601%. De igual manera, en la chimenea convergente se obtiene una eficiencia de conversión de energía térmica en flujo para la potencia disponible de 60%.

Tabla 4-7 Resultados obtenidos de los principales parámetros del sistema convencional y el sistema propuesto ubicados en Morelia, Michoacán

| | Convencional | Propuesto | % |
|--|--------------|-----------|-------|
| Radiación total diaria promedio mensual, \bar{H}_{tot} , MJ/m ² día | 20.09 | 21.46 | 6.82 |
| Radiación solar promedio mensual absorbida, \bar{S} , J/m ² día | 14.41 | 16.05 | 11.38 |
| Flujo de calor, \bar{q}_u , W/m ² | 158.4 | 237.2 | 49.75 |
| Calor útil captado, \bar{Q}_u , W | - | 11,091.5 | - |
| Eficiencia del colector, η_{col} , % | 18 | 11 | |
| Velocidad del flujo a la salida del colector, V_2 , m/s | 10.23 | 78 | 282 |
| Diferencia de presión total generada, Δp_{tot} , Pa | 48.01 | 288.7 | 601 |
| Presión extraída por la turbina, Δp_{turb} , Pa | 32.01 | 192.47 | 601 |

4.2 Conclusiones

Se concluye que el objetivo de este trabajo, que era el realizar la simulación, evaluación y diseño de una planta de chimenea solar, con características que permitan maximizar el aprovechamiento de la energía solar, mediante la determinación del ángulo de inclinación y cambio de geometría del colector, y el cambio de sección transversal del diámetro de la chimenea, se cumplió de manera satisfactoria. Se relataron las diversas ideas que dieron origen al desarrollo de la Chimenea Solar, poniendo en evidencia que la tecnología es más antigua de lo que se sugiere. Fueron expuestos y explicados el funcionamiento de la Chimenea Solar, así como los principios termodinámicos en que se basa. La validez de los diversos modelos matemáticos y cálculos aquí presentados se realizó acorde con la literatura e investigaciones disponibles con resultados aceptables. Se trató y se modeló sobre la única planta de Chimenea Solar funcional a gran escala construida hasta la fecha: la planta prototipo en Manzanares, España. Se expusieron diferentes variantes en la colocación y geometría del colector y la chimenea, pensadas para hacer más eficiente el desempeño de la planta y, en su caso, facilitar su construcción. El presente trabajo es una apropiada fuente de información para el inicio de futuras investigaciones sobre la tecnología de la Chimenea Solar o sobre temas relacionados.

Se observó que la Chimenea Solar surge como una alternativa al uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, en un intento por mitigar los efectos del calentamiento global y la disminución de recursos energéticos fósiles disponibles. La chimenea solar hace uso de 3 tecnologías perfectamente conocidas y las conjuga de una manera simple; el invernadero, la chimenea y el molino de viento. La idea ya había sido concebida con anterioridad por el ingeniero español Isidoro Cabanyes a

principios del siglo 20 y a una escala mucho menor, sin que fuera llevada a la práctica. Es hasta finales de los 70's y principios de los 80's cuando el concepto toma fuerza y se materializa con la construcción de una planta prototipo en la localidad de Manzanares, España, con el objetivo de realizar investigación y probar la factibilidad de la tecnología. El proyecto tuvo éxito y la planta operó satisfactoriamente generando una potencia alrededor de 50 kW, lo que demostró que el concepto es funcional. Utilizando el simulador numérico desarrollado para el sistema convencional de Manzanares, con las condiciones geográficas y meteorológicas de Morelia, Michoacán (tabla 4-6), los resultados obtenidos (tabla 4-5) muestran que el emplazamiento es adecuado para el funcionamiento de un sistema solar de chimenea convencional. Se determinó que el diferencial de presión total generado por el sistema es de 1,358 Pa y una potencia de 129.31 kW.

El funcionamiento de la chimenea solar ha sido descrito y se encuentra entendido en su totalidad. Se estableció que en el colector con un ángulo de inclinación adecuado, y que está en función de las características geográficas y meteorológicas del emplazamiento, incide mayor radiación solar en promedio anual. Para el sistema propuesto de colector inclinado, y utilizando el simulador numérico desarrollado, también con las condiciones de la ciudad de Morelia, se determinó que con un ángulo de inclinación fijo de 30° incide la mayor radiación sobre la superficie durante todo el año, 21.77 MJ/m², se incrementa 6.82% con respecto al colector horizontal.

Bajo las condiciones de la ciudad de Morelia, se observó que el ángulo de inclinación tiene una relación directa con el ángulo de incidencia y la cantidad de radiación absorbida, sin embargo, su influencia sobre la radiación absorbida promedio anual no es lineal, esto se debe a que la radiación que pasa a través de la cubierta del colector es mayor a medida que ésta incida normal en la superficie, las pérdidas ópticas por reflexión se minimizan, pero debido a que el ángulo de incidencia varía a cada instante origina que la magnitud de esta radiación varíe de igual manera a lo largo de todo el año, sin embargo, la posición en la que en promedio anual la mayor cantidad de radiación traspasa la cubierta es a 15° de inclinación. Se determinó la radiación anual media mensual absorbida por el colector, \bar{S} , 16.24 MJ/m² día, 11.38% más, y en el flujo de calor, \bar{q}_u , 158.4 W/m², 49.75% más, en relación a una superficie horizontal, lo que permite elevar la temperatura de un mayor volumen de aire.

Se observó que con el cambio de geometría en el colector y la inclusión del ángulo de inclinación adecuado, la energía cinética adquirida por el aire dentro del colector se incrementa debido al cambio en la sección transversal en su trayectoria hacia la salida del colector. Sabiendo que el caudal es constante en una tubería hermética, y que el aire es aspirado por efecto termosifón por la sección de entrada del colector hacia la salida del colector con una sección menor, y siendo un sistema hermético, la velocidad del flujo se incrementa. Considerando el cambio de geometría del colector a triangular convergente inclinado, con un área de entrada de 564.45 m² y un área de salida de 18.8 m², se determinó la velocidad del flujo a la salida del colector de 78 m/s, incremento de 762% con respecto al sistema convencional.

De manera similar, en la chimenea convergente se presenta el mismo efecto que en el colector, con un diámetro de entrada mayor que en la salida de la chimenea, el flujo se acelera generando una caída de presión, con un diámetro de entrada de 10.10 m y 8.16 m de diámetro a la salida, se obtiene una eficiencia de conversión de energía térmica en flujo para la potencia disponible de 60%. En la tabla 4-7 se muestran los resultados obtenidos de la simulación por la técnica de elemento finito, la diferencia de presión total generada de 288.7 Pa, y la diferencia de presión disponible para ser extraída por la turbina de 192.47 Pa, incremento de 601% con respecto al sistema convencional.

Se descubrió que la absorción de radiación del colector solar a lo largo del día sigue una curva que crece desde un valor mínimo, cerca de las horas frías de la mañana, llega a un valor máximo alrededor del mediodía y después disminuye a otro valor mínimo al atardecer. Una de las ventajas de la chimenea solar es que parte de la radiación solar se almacena en el suelo del colector y se libera durante la noche, haciendo que la generación de energía eléctrica continúe, incluso de noche. Este efecto se puede maximizar si en el suelo del colector se instala algún sistema que absorba radiación solar y almacene calor para después liberarlo durante la noche. Esto tendería a aplanar la curva de absorción de radiación del colector solar, haciendo que la cantidad de energía generada se mantenga relativamente constante a lo largo del día. De ésta forma, la salida de potencia de la planta puede ser manipulada para satisfacer los requerimientos energéticos del sitio, ya sea que se necesite una generación constante de energía o una alta generación de energía al medio día, que convenientemente coincide con un periodo de alta demanda.

De especial atención resultó ser otra de las ventajas de la Chimenea Solar; la cual es que, a diferencia de la mayoría de las tecnologías térmicas convencionales, ésta no utiliza agua para su proceso. Esta característica hace de la chimenea solar una opción muy atractiva no sólo para los lugares donde el agua no está disponible, pero también para lugares donde exista disponibilidad de agua, ya que con las condiciones climáticas y de contaminación actuales, ahora es imperativo ahorrar agua y disminuir su uso para procesos industriales. Convenientemente, los lugares donde el agua escasea poseen muy buenos índices de radiación solar, como son los desiertos y estepas.

La favorable recepción que ha tenido el concepto de chimenea solar en países con economías desarrolladas como los Estados Unidos, los Emiratos Árabes Unidos, Australia y China, demuestra que aunque se requiere de una elevada inversión inicial para la construcción de una planta comercial, los crecientes incentivos a las energías limpias y renovables hacen de la chimenea solar una opción cada vez más viable y económicamente rentable para la producción de energía eléctrica, ya que no requiere de combustible de ningún tipo y tampoco necesita de agua para llevar a cabo proceso alguno.

Con los datos obtenidos y presentados en el presente trabajo, se puede concluir que la tecnología de chimenea solar es técnicamente factible. Sus principios de funcionamiento son conocidos y comprendidos a fondo. Existen inconvenientes para la

construcción de plantas de escala comercial, principalmente la elevada inversión inicial, pero bajo los actuales marcos de fomento a las energías alternativas es posible, para economías desarrolladas, construir plantas de escala comercial económicamente viables, que en tiempos anteriores y bajo condiciones diferentes, como en el caso de Australia, no habrían sido posibles. Es probable que en un futuro cercano y con la creciente demanda por energías renovables, la chimenea solar se desarrolle alrededor del mundo y se convierta en una popular manera de generar energía eléctrica. Una idea que fue ignorada al principio, puede convertirse en una de las opciones principales para generar energía limpia sin afectar al medio ambiente.

4.3 Trabajos futuros

Resaltó el hecho de que existe un gran campo de investigación alrededor de la chimenea solar, principalmente con el objetivo de aumentar su eficiencia y poder reducir sus dimensiones, que en muchos casos la convertían en una tecnología prohibitiva. Se necesita de investigación para desarrollar nuevos materiales para el colector solar, que permitan captar una mayor cantidad de radiación solar y convertirla en calor sensible en el aire dentro de él. Para el colector y la chimenea se necesita investigación que permita reducir sus dimensiones.

Los resultados del estudio mencionados, indican un gran incremento en la velocidad del flujo a la salida del colector, que es donde se presentan dos cambios en la dirección del flujo, primero del ángulo de inclinación del colector a la horizontal, y de la horizontal a la vertical hacia la chimenea.

Como lo muestra la figura 4-16, debido a la velocidad del flujo y a los cambios de dirección, se genera flujo turbulento formando un vórtice en su ascenso hacia la chimenea, precisamente en la sección de la turbina, donde ocasionaría graves problemas de operación y estabilidad a su paso por la turbina, además de las pérdidas de energía que esto ocasiona.

Por lo anterior, es un área de análisis interesante para diseñar la forma geométrica de conexión adecuada entre la base de la chimenea convergente y el colector triangular convergente para suavizar el cambio de dirección, o bien, la colocación de la turbina en la sección horizontal donde se presenta flujo laminar a muy buena velocidad.

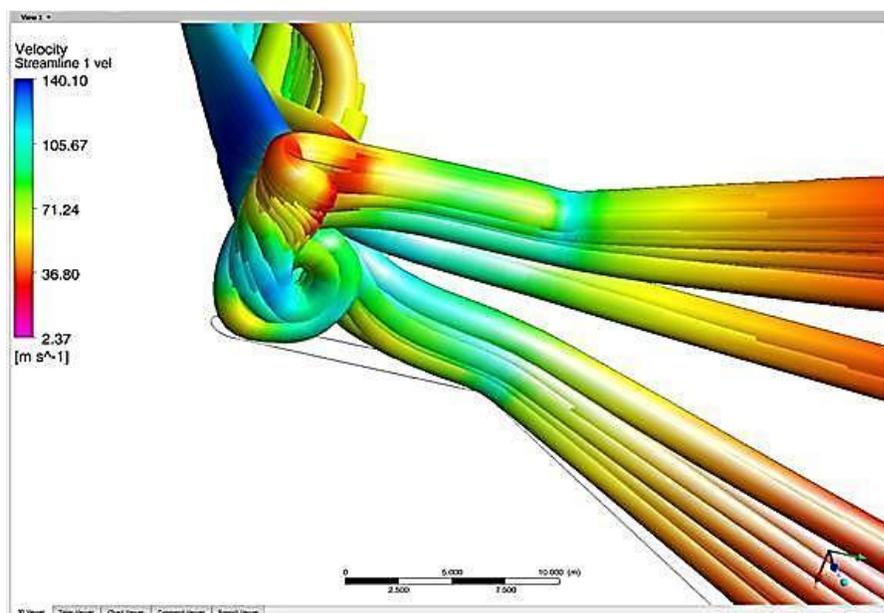


Figura 4-16 Perfil de velocidad en la sección de conexión colector – chimenea en sistema propuesto

De igual manera, la figura 4-17 muestra el comportamiento de la presión en la misma sección, pero en éste caso, recordando que la presión total generada por el sistema es la diferencia de presión entre la entrada y la salida del colector, beneficia al sistema que se presente ésta disminución, por esto es que el análisis de ésta sección merece atención.

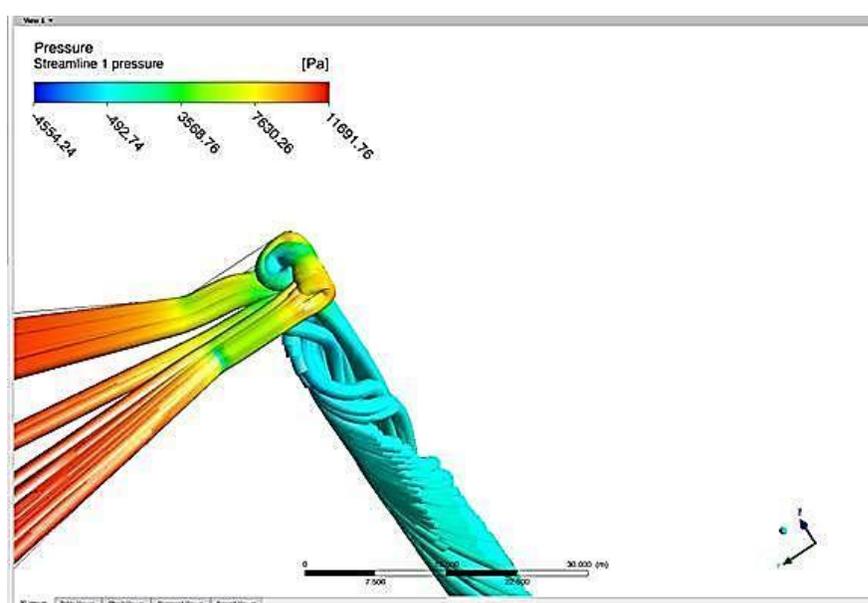


Figura 4-17 Perfil de presiones en la sección de conexión colector – chimenea en sistema propuesto

Como se puede apreciar en la figura 4-18, aparentemente a partir de la mitad de la altura de la chimenea, la velocidad del flujo es constante, la altura de la chimenea pudiera ser analizada con fines de optimización.

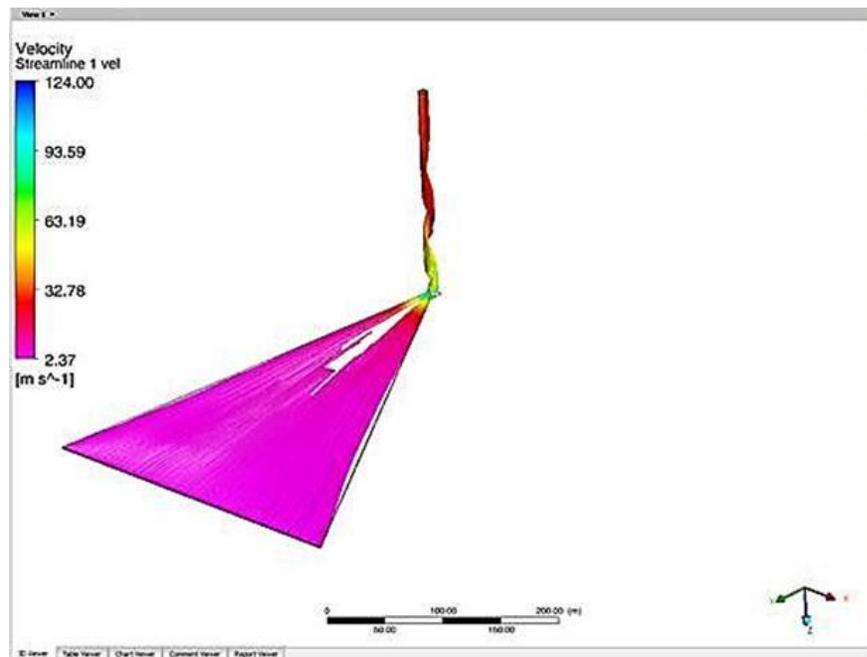


Figura 4-18 Perfil de velocidades en sistema propuesto

Referencias

- Atit Koonsrisuk, T. C. (2012). Mathematical modeling of solar chimney power plants. *Energy (Elsevier)*, 1 - 9.
- Azevedo, L. S. (1985). Natural convection in open-ended inclined channels. *J. Heat Transfer* 107, 893–901.
- Beckman, W. K. (1977). *Solar Heating Design*. New York: John Wiley & Sons.
- Bernardes, M. D. (2003). Thermal and technical analyses of solar chimneys. *Solar Energy* 75, 511–524.
- Brandemuehl, M. B. (1980). Transmission of diffuse radiation through CPC and flat-plate collector glazings. *Solar Energy* 24 (5), 511–513.
- Castell, X. E. (2012). Energías Renovables. En X. E. Castell, *Energías Renovables* (pág. 627). Madrid, España: Diaz de Santos.
- Chitsomboon, T. (1999). The effect of chimney-top convergence on efficiency of a solar chimney. *Proceeding of the 13th National Mechanical Engineering Conference*.
- Churchill, S. C. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Transfer* 18, 1323–1329.
- F. W. Stoecker, J. W. (1982). *Refrigeration and Air Conditioning*. McGraw- hill Book Company.
- Fujii, T. I. (1972). Natural convection from a plate with arbitrary inclination. *Int. J. Heat Mass Transfer* 15, 755–767.
- H. H. Al-Kayiem, Q. A.-N. (2013). *Geometry Alteration Effect on the Performance of a Solar-Wind Power System*. Baghdad: Al- Nahrain Univ. /Iraq.
- Haaf, W. (1984). Part II: Preliminary test results from theManzanares pilot plant. *Int. J. Solar Energy* 2, 141–161.

- Haaf, W. F. (1983). Part I Principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *Int. J. Solar Energy* 2, 3–20.
- J., S. (1995). The solar chimney. En S. J., *The solar chimney*. Stuttgart, Germany: Edition Axel Menges.
- JG., C. (1990). Glossary of atmospheric chemistry terms. *Pure Appl Chem* ;62(11), 2167 - 2219.
- John A. Duffie, W. A. (1991). *Solar Engineering of thermal processes*. Madison, Wisconsin, USA: Wiley-Interscience Publication.
- Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. Barcelona, España: CEAC.
- Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering : processes and systems*. Burlington, MA, USA: Elsevier Inc.
- Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering : processes and systems*. Burlington, MA 01803, USA: Elsevier's Science & Technology.
- Kashiwa BA, K. C. (2008). The solar cyclone: a solar chimney for harvesting atmospheric water. *Energy*; 33, 331-339.
- Koonsrisuk A, C. T. (2007). Dynamic similarity in solar chimney modeling. *Solar Energy*, 1439 - 1446.
- Koonsrisuk A, C. T. (2009). Accuracy of theoretical models in the predic prediction of solar chimney performance. *Solar Energy*, 1764-71.
- Koonsrisuk A, C. T. (2009). Single dimensionless variable for solar tower plant modeling. *Solar Energy* (83), 2136-43.
- Koonsrisuk A, L. S. (2010). Constructal solar chimney configuration. *Int J Heat Mass Tran* 53(1-3), 327-333.
- Koonsrisuk, A. (2012). Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants. *ENERGY Elsevier*, 582–589.
- Liu, B. J. (1963). The long-term average performance of flat-plate solar. *Solar Energy* 7, 53–74.

- Liu, B. J. (1977). *Application of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*. Ashrae, Atlanta: R.C. (Eds.).
- Lorenzo, E. (2002). De los archivos históricos de la energía solar. Las chimeneas solares. De una propuesta española en 1903 a la central de Manzanares. *Era Solar: Energías Renovables*, 64 - 68.
- McAdams, W. (1954). *Heat Transmission, third ed.* New York: Mc Graw-Hill.
- Ming T, d. R. (s.f.). *Int Journal Energy Res.* Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1002/er.1910>
- Nadia Saifia, N. S. (2012). EXPERIMENTAL STUDY AND SIMULATION OF AIRFLOW IN SOLAR CHIMNEYS. *Energy Procedia*, 1289 -1298.
- Ninic, N. (2006). Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration. *Elsevier Solar Energy* , 1.
- Padki, M. a. (1999). On a simple analytical model for solar chimneys. *International Journal of Energy Research*, 23, 289-294.
- Pasumarthi, N. S. (1998). Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model - Part I: mathematical model development. *Int. J. Energy Research* 22, 277-288.
- Riveros Rosas, D. (3 y 4 de Octubre de 2011). SOLARIMETRÍA. *Curso de actualización*. Chihuahua, Chihuahua, México: Instituto de Geofísica, UNAM.
- Salah Larbi, A. B. (2010). Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews (ELSEVIER)*, 470 - 477.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary- Layer Theory, 7th Edition*. New York: McGraw-Hill Company.
- T., C. (2001). A validated analytical model for flow in solar chimney. *Int J Renew Energ Eng*, 339 - 346.

- Von Backström TW, G. A. (2000). Compressible flow through solar power plant chimneys. *J Sol Energ-T ASME*, 138-45.
- Walter Z., S. A. (1984). Design, Construction and testing of a Chimney that Reduces Dangerous Temperature in a radiative Convective Solar Dryer. *Solar Energy, Vol. 32, No. 5*.
- Weinrebe G, S. W. (2001). Up-draught solar tower and down-draught energy tower - a comparison. *Proceedings of the ISES solar World Congress 2001*. Adelaide, Australia.
- Xinping Zhou, J. Y. (2009). Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *Science Direct (Elsevier)*, 178 - 185.
- Zhou XP, B. M. (2012). Influence of atmospheric cross flow on solar updraft tower inflow. *Energy (Elsevier) 42(1)*, 393 - 400.