



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS
PROCESOS DE ENERGÍAS RENOVABLES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO
(ÁREA MECÁNICA)
P R E S E N T A:
LUIS DANIEL PANAMÁ TOVAR

DIRECTOR DE TESIS:
ING. ALFREDO MONTAÑO SERRANO



MÉXICO

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Por ser la máxima casa de estudios y por formar día con día a profesionista del más alto nivel.

A LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

Por abrirme las puertas de sus aulas y laboratorios en donde se me doto de los conocimiento y principios para ser un profesionista y una persona de bien.

A MIS PROFESORES

Por ser la parte esencial en mi formación como profesionista y por proporcionarme sus conocimientos y experiencias sin esperar nada a cambio, sólo la satisfacción de saber que su trabajo a rendido frutos en las nuevas generaciones de profesionales de la ingeniería.

A MIS ASESORES

Por el apoyo y orientación que me brindaron para poder concluir este trabajo.

A MI DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alfredo Montaña Serrano mi más grande afecto y admiración ya que gracias a sus conocimientos, orientación, confianza y sabiduría pude dar este gran paso en mi vida, a usted gracias

A MI MADRE

Por sentirse orgullosa a pesar de haber pasado momentos difíciles. Para ti con todo mi amor, gracias mamá.

A MIS HERMANOS

A ustedes Memo y Paola, pero en especial a ti Víctor que aunque a miles de kilómetros siempre estuviste al tanto de mis triunfos y fracasos y que con tus consejos me enseñaste a ser una persona noble y buena, a los tres mil gracias

A MIS TIOS

Patricia, (Patty), Leopoldo (Polito), Luciano (chano), José (Tío José), María (un ángel que vive en el cielo y que desde donde este sé que está orgullosa de mi, tía maría), Guadalupe (Tía Lupe), a ustedes por creer en mí y porque con su ejemplo desde niño me enseñaron a ser una persona honesta y de buenos sentimiento, con todo mi corazón muchas gracias

A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO

A todos ustedes compañeros gracias por todo, pero en especial al Lic. José Luis Ramos Blancas por brindarme su apoyo, confianza y amistad, muchas gracias

A MIS AMIGOS

A todos a los que de una forma o de otra estuvieron siempre conmigo y contribuyeron con su apoyo a la realización de este sueño.

CON TODO MI AMOR, RESPETO Y ADMIRACIÓN

Ing. Luis Daniel Panama Tovar

INDICE

Símbolos y Abreviaturas	5
Introducción	6
Capitulo I	11
Energías Renovables	
Capitulo II	34
Procesos de Transferencia de Calor	
Capitulo III	81
Radiación Solar	
Capitulo IV	97
Calentamiento de Agua con Colectores Solares	
Conclusiones	107
Bibliografía	111

SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

A	Área
BTU	British Thermal Unit (Unidad Térmica Británica)
°C	Grados Centígrados
Cal	Caloría
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros Cuadrados
°F	Grados Fahrenheit
ft ²	Pie Cuadrado
gr	Gramo
GW	Giga-Watts
h	Coeficiente Convectivo
hp	Caballos
hr	Hora
J	Joule
k	Conductividad Térmica
°K	Grados Kelvin
Kcal	Kilo-Caloría
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetros
KW	Kilo-Watts
LMTD	Diferencia de Temperatura Media Logarítmica
Lts	Litros
m	Metros
m ²	Metros Cuadrados

m³ Metros Cúbicos
min minuto
MJ Mega-Joules
MW Mega-Watts
Qud Calor útil durante el día
s Segundos
T Temperatura
Ton Toneladas
TWH Teravattios por Hora
W Watts
 Micrones

INTRODUCCIÓN

Durante siglos, tanto el hombre como los demás seres vivos han aprovechado la energía solar, no sólo como una opción energética sino como fuente de vida, pues sin esa estrella no habría vida en la Tierra. En las últimas décadas, la energía solar ha cobrado importancia como fuente energética, puesto que las reservas de combustibles fósiles no son eternas. El que ésta fuente de energía sea rentable depende de las investigaciones que se realicen, de los recursos económicos destinados a su estudio y del interés que se preste a su desarrollo.

La energía solar que recibimos en nuestro planeta es el resultado del proceso de fusión que tiene lugar en el núcleo del Sol, de toda esa energía que se produce en este proceso nuestro planeta recibe menos de la millonésima parte.

La capacidad que tiene el Sol para calentar los objetos expuestos a sus rayos es un hecho cotidiano para nosotros. En la actualidad son muchos los sistemas que aprovechan la energía calorífica del sol. En todos estos sistemas el objetivo es el mismo, es decir, elevar la temperatura de alguna sustancia, ya sea el calentamiento de agua, de aire o la generación de algún movimiento que se pueda transformar en electricidad.

Los sistemas solares térmicos para calentamiento de agua, unen varios aspectos importantes, entre los cuales se encuentran, el ahorro energético y el respeto al medio ambiente.

La quema de combustibles fósiles crea un impacto irreversible, ya que el sistema climático mundial experimenta una alteración de origen antropogénico, es decir efectos producidos por la actividad humana.

La principal ventaja del aprovechamiento de las energías renovables es su bajo o nulo impacto ambiental, además de contribuir en la conservación de los recursos no renovables y postergar su término. Por otro parte la distribución de la energía solar que llega a la tierra no es uniforme, depende mucho de factores como son: la hora del día, el lugar, la orientación de la superficie, y las condiciones atmosféricas. Estos factores ocasionan que la energía que recibe la tierra del Sol tenga dos componentes esenciales que son: la radiación directa, que llega a la superficie de la tierra sin haber sufrido ningún cambio y la

radiación difusa que sufre cambios por efectos de absorción y dispersión de los agentes que componen la atmósfera terrestre.

Algunos de los primeros experimentos que se han realizado utilizando la Energía Solar son los siguientes:

En 1774, Joseph Priestley expuso óxido de mercurio a los rayos concentrados del sol y recogió el gas producido al calentarlo. Encontró que con este gas una vela ardía con un brillo mucho mayor que en el aire y que un ratón sobrevivía más tiempo en un volumen dado de este gas, que parecía ser "aire más perfecto". Así fue descubierto el oxígeno. Estos descubrimientos permitieron al químico francés Lavoisier proponer correctamente la teoría de la combustión.

En 1872 en el desierto de Chile Septentrional se construyó una planta de destilación solar que cubría 4,700 m² de superficie, para transformar agua salada en dulce, que se emplearía en una mina de nitrato. Láminas de vidrio inclinadas cubrían canales de agua salada, transmitiendo los rayos del sol y reduciendo la radiación infrarroja perdida, calentando de esta manera el agua. El vapor de agua que se condensaba en la cara interna del vidrio era enfriado por el aire exterior y una vez condensado se vertía a unos canalones. Esta planta funcionó eficazmente durante 40 años, hasta que la mina se agotó.

En 1878 en París, la luz solar era enfocada a una caldera de vapor que hacía funcionar un pequeño motor que a su vez accionaba una impresora.

De 1907 a 1911, F. Shuman desarrolló motores de vapor solares de varios hp. que bombeaban agua

En 1913, cerca del Cairo (Egipto), F. Shuman y C. V. Boys. construyeron un gran motor solar de más de 50 hp con grandes cilindros parabólicos que concentraban la radiación solar en un tubo central. Bombeaba agua desde el Río Nilo

Uno de los primeros intentos de almacenar energía producida por el sol fue el de J. A. Hamington en Nuevo México, aproximadamente en 1915. Concentró luz solar en la caldera de un motor de vapor que bombeaba agua a un tanque de 19,000 litros situado a una altura de 6 m del que descendía de nuevo por una turbina accionando un dinamo y pequeñas lámparas eléctricas que iluminaban una pequeña mina de noche y día.

Con excepción de lo realizado por C. G. Abbott, poco se hizo por el desarrollo de la energía solar durante los siguientes 30 años. Abbott presentó al Congreso Internacional de Energía, celebrado en Washington en 1936 un motor de vapor solar de ½ hp y en 1938 presentó en Florida una versión mejorada de 1/5 hp con una caldera tipo flash.

De 1941 a 1946 F. Molero desarrolló motores solares de vapor en Tashkent.

El hombre ha usado la radiación solar durante milenios en la agricultura. Cuando los instrumentos solares se estaban concibiendo, se estaba dando al mismo tiempo un tremendo impulso a la investigación agronómica y a la mejora en la eficacia del almacenamiento de energía solar en la forma de alimentos. Se prestó también atención a la investigación básica del proceso fotosintético de las plantas. El almacenamiento químico de energía en algas, bajo condiciones ideales de laboratorio, alcanzo rendimientos muy altos, de un 30% de la energía radiante absorbida. Las plantas agrícolas normales almacenan 2/10 del 1% recibida a lo largo del año. Usando directamente energía solar sin la intercesión de las plantas verdes se pueden convertir varias centésimas de radiación solar en energía mecánica o eléctrica y una porción mucho mayor en calefacción, refrigeración y destilación de agua.

Quizás la primera ayuda de cierta importancia a la investigación básica sobre el uso directo de la energía solar fue la beca Cabot (Cabot Fund) concedida al Instituto Tecnológico de Massachusettes y a la Universidad de Howard. Entonces se realizaron los primeros experimentos de calefacción de casas, de colectores planos, y de posibilidades fotoquímicas. En 1950, se celebró un importante simposio sobre calefacción de edificios.

En 1949, en la reunión del centenario de la American Association for the Advancement of Science (Sociedad Americana para el Progreso de la Ciencia) en Washington, se dedico una sesión a las fuentes de energía, incluidas la solar y la atómica. En esta reunión el autor destaco las posibilidades del uso directo de la energía solar y sus dificultades económicas, aspectos que quedaron subrayados posteriormente en diversas publicaciones y en un ciclo de conferencias de Sigma Xi que es una de las sociedades científicas más grandes y antiguas del mundo.

Durante los años cuarenta se realizaron en los Estados Unidos algunas investigaciones prácticas sobre el uso directo de la energía solar, dirigidos por la Dra. María Telkes y el Dr. George O. G. Lof. La mayor parte de cuyo trabajo se

desarrollo en el M. I. T. una subvención de la Guggenheim Fund (fundación Guggenheim) y una importante ayuda de la fundación Rockefeller han permitido que desde 1955 se desarrolle en la Universidad de Wisconsin un importante programa de investigación sobre el uso de la energía solar concediendo particular énfasis a sus aplicaciones en países no industrializados.

Los calentadores solares de agua se han fabricado durante muchos años en muchos países. Los científicos Hottel y Woertz realizaron en 1942 un estudio básico de los colectores planos para calentar agua. El investigador Petukhov publicó en 1953 un informe más completo sobre calentadores solares de agua con 50 figuras y diagramas. Los factores que intervienen en el calentamiento solar del agua fueron examinados en 1955 por los científicos Morse y Mason.

En la conferencia sobre Nuevas Fuentes de Energía de las Naciones Unidas en Roma en 1961 se expuso magníficamente el estado actual del calentamiento solar de agua. Los científicos Hisada y Oshida resumieron bien la exposición, comparando los costos de los distintos calentadores descritos. Se notificaron considerables avances; por ejemplo, en Japón se vendían calentadores plásticos baratos al ritmo de 60,000 cada año y en Israel una compañía exportaba a 25 países calentadores a un precio que iba de entre 250 y 400 dólares.

Parecía existir un acuerdo generalizado en las estimaciones, se considera adecuada la temperatura de 50 °C para el agua caliente del baño. En muchos climas soleados estos requerimientos se pueden satisfacer con un tanque de almacenamiento aislado térmicamente y un colector solar.

Aprovechamiento de la Energía Solar

El aprovechamiento de la energía solar se refiere a la conversión directa de la radiación solar en calor y en electricidad, llamadas conversión fototérmica y fotovoltaica, respectivamente. La energía solar es la causa indirecta de que pueda aprovecharse la energía que proporcionan las plantas y los animales, mejor conocida como biomasa. También al Sol se deben los movimientos de las diferentes masas de aire que ocasionan los vientos; así, la energía eólica o del viento es indirectamente energía solar. Además, el depósito de organismos que alguna vez estuvieron vivos en las capas de la corteza terrestre no es otra cosa que los componentes del petróleo y el carbón. De esa manera, los combustibles fósiles son también indirectamente producto de la energía solar. Finalmente, la energía hidroeléctrica proviene de una enorme máquina térmica, cuyo

combustible es precisamente la energía solar. Cuando los rayos del Sol calientan el agua de la Tierra se produce vapor de agua; éste se eleva formando nubes; ahí, el vapor de agua se condensa y se precipita, lo que aumenta el nivel de agua de por ejemplo, una presa.

Los movimientos de rotación y traslación de la Tierra hacen que varíe la cantidad de radiación que recibe el planeta, así, para conocer la radiación por unidad de tiempo y por unidad de superficie que recibe un lugar determinado de la Tierra, se deben conocer varios parámetros como son las latitudes y las longitudes geográficas, la altura sobre el nivel del mar, la concentración de vapor de agua y la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera.

Los principales sistemas y dispositivos solares pueden clasificarse no sólo como fototérmicos y fotovoltaicos, sino también conforme a su temperatura de operación. En los fototérmicos, la temperatura puede ser baja, intermedia o alta. También pueden clasificarse de acuerdo con su uso en viviendas, industrias, en el campo o en la ciudad.

ENERGIAS RENOVABLES

Los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural) son recursos finitos que inexorablemente van a agotarse; de ahí su denominación de recursos no renovables. Por fortuna, existen también las energías renovables que se definen como formas de energía que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo que permanecerán los seres humanos en el planeta, y cuyo aprovechamiento es técnicamente variable.

Dentro de las energías renovables se encuentran principalmente las siguientes: solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica y oceánica.

Las energías renovables ofrecen la posibilidad de obtener energía útil para diversas aplicaciones, su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que el de las fuentes convencionales y poseen el potencial para satisfacer todas nuestras necesidades de energía presentes y futuras, además, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propiciar el desarrollo regional.

➤ ENERGIA DEL VIENTO O EÓLICA

Del 100% de la electricidad que se genera anualmente en todo el mundo, el 65% es producido quemando combustibles fósiles, el resto se obtiene de otras fuentes, incluyendo la energía nuclear, hidroelectricidad, geotérmica, biomasa, solar y el viento. Solamente cerca del 0.3% del total de la electricidad generada mundialmente es producida convirtiendo la energía cinética del viento en energía eléctrica, sin embargo, el uso del viento para la producción eléctrica se ha estado extendiendo rápidamente en años recientes, debido en gran parte a las mejoras tecnológicas, la maduración de la industria y una creciente preocupación por las emisiones asociadas a la quema de combustibles fósiles. Todavía hay mucho lugar para crecer, pues solamente una porción pequeña del recurso utilizable del viento está siendo aprovechada mediante las regulaciones a la industria eléctrica, así como con incentivos por parte de los gobiernos. Las

políticas eficaces ayudarán a allanar el camino y asegurar que la energía eólica pueda competir con otras fuentes de energía en el mercado de la electricidad.

La energía eólica tiene muchas ventajas que la hacen una fuente de energía atractiva tanto en gran escala como para pequeñas aplicaciones. Las características beneficiosas de la energía eólica incluyen:

- Energía limpia e inagotable; la energía del viento no produce ninguna emisión y no se agota en un cierto plazo. Una sola turbina de viento de un megavatio que funciona durante un año puede reemplazar la emisión de más de 1.5 toneladas de dióxido de carbono, 6.5 toneladas de dióxido de sulfuro, 3.2 toneladas de óxidos del nitrógeno, y 60 libras de mercurio.
- Desarrollo económico local; las plantas eólicas pueden proporcionar un flujo constante de ingresos a los terratenientes que arriendan sus campos para la explotación del viento, y un aumento en la recaudación por impuestos territoriales para las comunidades locales.
- Tecnología modular y escalable; las aplicaciones eólicas pueden tomar muchas formas, incluyendo grandes granjas de viento, generación distribuida, y sistemas para uso final. Las aplicaciones pueden utilizar estratégicamente los recursos del viento para ayudar a reducir los riesgos por el aumento en la carga o consumo y costos producidos por cortes.
- Estabilidad del costo de la energía; la utilización de energía eólica, a través de la diversificación de las fuentes de energía, reduce la dependencia a los combustibles convencionales que están sujetos a variaciones de precio y volatilidad en su disponibilidad.
- Reducción en la dependencia de combustibles importados; la energía eólica no está afectada por la compra de combustibles importados, ayudando así a mantener los fondos dentro del país, y disminuyendo la dependencia con los gobiernos extranjeros que proveen estos combustibles.

➤ HIDRÁULICA

La energía que llega del sol a la tierra da lugar, entre otros fenómenos, a la evaporación de agua contenida en su superficie, principalmente en los océanos.

Esta humedad se acumula en nubes que viajan largas distancias y se deposita en forma de lluvia sobre las montañas, muchas de ellas alejadas del mar. El agua, acumulada en corrientes y por gravedad, busca de nuevo el mar, formando ríos. Este caudal, que se puede manifestar en grandes caídas o en muchas corrientes, es la fuente de la energía hidroeléctrica.

En muchos casos, esta energía se deposita en forma potencial en embalses y se transforma en energía aprovechable al desplazarse hacia niveles inferiores. El agua en movimiento empuja dispositivos giratorios que la convierten en energía mecánica o que mueven generadores de electricidad.

La energía hidráulica se basa en aprovechar la caída del agua desde cierta altura. La energía potencial, durante la caída se convierte en cinética. El agua pasa por las turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que finalmente, se transforma en energía eléctrica por medio de los generadores. Es un recurso natural disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua, y una vez utilizada, es devuelta río abajo. Su desarrollo requiere construir pantanos, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad. Todo ello implica la inversión de grandes sumas de dinero, por lo que no resulta competitiva en regiones donde el carbón o el petróleo son baratos. Sin embargo, el peso de las consideraciones medioambientales y el bajo mantenimiento que precisan una vez que están en funcionamiento hacen que se centre la atención en esta fuente de energía.

La fuerza del agua ha sido utilizada durante mucho tiempo para moler trigo, pero fue con la Revolución Industrial, y especialmente a partir del siglo XIX, cuando comenzó a tener gran importancia con la aparición de las ruedas hidráulicas para la producción de energía eléctrica. Poco a poco la demanda de electricidad fue en aumento. El bajo caudal del verano y otoño, unido a los hielos del invierno hacían necesaria la construcción de grandes presas de contención, por lo que las ruedas hidráulicas fueron sustituidas por máquinas de vapor que utilizaban carbón como combustible.

La primera central hidroeléctrica moderna se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad.

A principios de la década de los noventa, las primeras potencias productoras de energía hidroeléctrica eran Canadá y Estados Unidos. Canadá obtiene un 60% de su electricidad de centrales hidráulicas. En todo el mundo, este tipo de energía representa aproximadamente la cuarta parte de la producción total de electricidad, y su importancia sigue en aumento. Los países en los que constituye la fuente de electricidad más importante son Noruega (99%), Zaire (97%) y Brasil (96%). La central de Itaipú, en el río Paraná, está situada entre Brasil y Paraguay; se inauguró en 1982 y tiene la mayor capacidad generadora del mundo. Como referencia, la presa Grand Coulee, en Estados Unidos, genera unos 6,500 MW siendo una de las más grandes.

En algunos países se han instalado centrales pequeñas con capacidad para generar entre un kilowatt y un Megawatt. En muchas regiones de China, por ejemplo, estas pequeñas presas son la principal fuente de electricidad. Otras naciones en vías de desarrollo están utilizando este sistema con buenos resultados. En Euskadi, debido a que los ríos son de curso corto y no conducen caudales importantes, existen bastantes minicentrales hidráulicas. En el resto de España hay problemas de escasez de agua y se han construido presas para riego. Posteriormente han sido aprovechadas para generar energía, y actualmente tenemos una fracción importante de energía hidroeléctrica instalada.

➤ BIOENERGÍA

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material de vegetal y animal, tales como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o animal.

El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. La energía química que se almacena en las plantas y los animales (que se alimentan de plantas u otros animales), o en los desechos que producen, se llama bioenergía. Durante los procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía en forma de calor, y el carbón se oxida nuevamente convirtiéndose en dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el

crecimiento de la planta. Esencialmente, el uso de la biomasa para la energía es la inversa de la fotosíntesis.

Este proceso de captación de la energía solar y su acumulación en las plantas y árboles como energía química es un proceso bien conocido. Los carbohidratos, entre los que se encuentra la celulosa, constituyen los productos químicos primarios en el proceso de bioconversión de la energía solar y al formarse aquellos, cada átomo gramo de carbono (14 gr) absorbe 112 Kcal. de energía solar, que es precisamente la que después se recupera, en parte con la combustión de la celulosa o de los combustibles obtenidos a partir de ella (gas, alcohol, etc.). En la naturaleza, toda la biomasa se descompone en sus moléculas elementales acompañada por la liberación de calor. Por lo tanto la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales pero en una tasa más rápida. Por lo tanto, la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. Utilizar esta energía recicla al carbón y no añade dióxido de carbono al medio ambiente, en contraste con los combustibles fósiles. De todas las fuentes renovables de energía, la biomasa se diferencia en que almacena energía solar con eficiencia. Además, es la única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

La biomasa puede utilizarse directamente (por ejemplo combustión de madera para la calefacción y cocinar) o indirectamente convirtiéndola en un combustible líquido o gaseoso (ej: etanol a partir de cosechas del azúcar o biogás de la basura animal). La energía neta disponible en la biomasa por combustión es de alrededor de 8 MJ/kg para la madera verde, 20 MJ/kg para la materia vegetal seca en horno, 55 MJ/kg para el metano; en comparación con cerca de 23 a 30 MJ/kg para el carbón. La eficiencia del proceso de la conversión se determina cuánto la energía real puede ser utilizada en forma práctica.

Biocombustibles

La producción de biocombustibles tales como el etanol y el biodiesel tiene el potencial de sustituir cantidades significativas de combustibles fósiles en varias aplicaciones de transporte. El uso extenso del etanol en Brasil ha demostrado que los biocombustibles son técnicamente factibles en gran escala. La producción de biocombustibles en los EE.UU. y Europa (etanol y biodiesel) está aumentando, siendo la mayoría de los productos utilizados en combustible

mezcla, por ejemplo E20 está compuesto por 20% de etanol y 80% de gasolina y se ha descubierto que es eficaz en la mayoría de los motores de ignición sin ninguna modificación. Actualmente la producción de biocombustibles es apoyada con incentivos del gobierno, pero en el futuro, con el crecimiento de los sembrados dedicados a la bioenergía, y las economías de la escala, las reducciones de costos pueden hacer competitivos a los biocombustibles.

Producción eléctrica

La electricidad puede ser generada a partir de un número de fuentes de biomasa y al ser una forma de energía renovable se la puede clasificar como "energía verde". La producción de electricidad a partir de fuentes renovables de biomasa no contribuye al efecto invernadero ya que el dióxido de carbono liberado por la biomasa cuando es quemado, (directa o indirectamente después de que se produzca un biocombustible) es igual al dióxido de carbono absorbido por el material de la biomasa durante su crecimiento.

Calor y Vapor

La combustión de la biomasa o de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares y cocinar, o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía. El vapor generado por la biomasa puede utilizarse en el accionamiento de turbinas de vapor para la producción de energía eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente.

Gas Combustible

Los biogases producidos de la digestión o de la pirolisis anaerobia tienen un buen número de aplicaciones. Pueden ser utilizados en motores de combustión interna para accionar turbinas para la producción de energía eléctrica, pueden utilizarse para producir calor para necesidades comerciales y domésticas, y en vehículos especialmente modificados como un combustible.

Residuos agrícolas

Una gran cantidad de residuos de cultivo son producidos anualmente en el mundo y a menudo son desechados. Estos incluyen desechos de arroz, bagazo de caña, cáscara de coco, cáscara de nuez, aserrín y desechos de cereal. Estos desechos tienden a ser relativamente bajos en contenido de humedad (10-30%) y por lo tanto son más adecuados para la combustión directa que para la fermentación anaeróbica.

Los desechos del arroz se encuentran entre los residuos agrícolas más comunes. Estas representan del 20% al 25% de los granos de arroz cosechados sobre la base de su peso y son usualmente retirados en el centro de procesamiento.

Bagazo

La caña de azúcar es una de las plantas con una mejor eficiencia fotosintética y requiere muy pocos suministros de herbicidas y pesticidas. Si crece o no en una forma verdaderamente sustentable es debatible, pues se requiere adicionar nutrientes al suelo para reemplazar los que fueron removidos con la cosecha y éstos a menudo provienen de fertilizantes químicos.

Los ingenios azucareros desde hace muchas décadas tienen experiencia en la logística para el transporte y manejo de grandes volúmenes de biomasa, en concreto alrededor de 300,000 ton/año. Cada tonelada de caña de azúcar procesada en los ingenios produce alrededor de 250 Kg. de bagazo.

En países donde el sector eléctrico es privado, algunas compañías azucareras se han convertido en productores independientes de energía (a menudo en consorcios con los proveedores locales de energía). De esta manera ahora incineran todo el bagazo obtenido en plantas de cogeneración de alta eficiencia y exportan una cantidad importante del excedente de energía al sistema eléctrico.

La incineración del bagazo, junto con la recolección del desperdicio de caña que normalmente es quemado antes de la cosecha, podría proveer combustible de la bioenergía hasta un total de 50 GW de la capacidad de generación a nivel mundial.

Desechos de cereales

Los pequeños cultivos de cereal producen alrededor de 2.5 a 5 ton/día de desecho, dependiendo del tipo, variedad y época de cultivo. Cuando se trata del maíz y el sorgo, pueden ser obtenidas mayores cantidades. Estos residuos del cereal varían del 10 al 40% de humedad y tienen un valor calorífico de entre los 10 y 16 MJ/Kg.

En términos comparativos una tonelada de desechos de cereal puede producir la misma cantidad de energía que el equivalente a aproximadamente 0.5 toneladas de carbón ó 0.3 toneladas de petróleo.

Dinamarca cuenta con miles de instalaciones que utilizan la quema de estos residuos para brindar servicios de calefacción en zonas públicas (3-5 MW), procesos industriales (1-2 MW) y calefacción en hogares (10-100 KW). Respecto a las aplicaciones usadas en las mismas granjas, estas se orientan al secado de granos o a la calefacción de establos o lugares donde se encuentran los animales, además de proveer servicios domésticos de calefacción y calentamiento de agua.

Desechos animales

El estiércol de cerdo, estiércol de otros tipos de ganado y los desechos de pollo son fuentes útiles de bioenergía, pues estos animales a menudo son criados en áreas confinadas, las cuales producen una considerable concentración de materia orgánica. Anteriormente estos desechos animales eran recuperados y vendidos como fertilizantes o simplemente esparcidos sobre la tierra de cultivo. Sin embargo, los controles ambientales más rigurosos referentes a la contaminación del agua han obligado a un mejor manejo de los desechos. Esta situación proporciona incentivos para considerar la fermentación anaeróbica de los materiales, sin embargo el volumen de suministro anual, las variaciones de temporada y características específicas del recurso deben ser ponderadas cuidadosamente antes de desarrollar una planta.

Desechos municipales

Los desechos orgánicos sólidos originados en áreas urbanas representan una fuente considerable de energía. Los desechos sólidos municipales y su manejo

en los Estados Unidos representan un buen ejemplo. De las 208 millones de toneladas recolectadas en 1995 aproximadamente solo el 14% fueron no combustibles o no fermentables. El tratamiento de estos desechos en los Estados Unidos y en otras partes se efectúa por recuperación, combustión o relleno sanitario, pero solo una pequeña parte es procesada mediante plantas incineradoras de desechos municipales principalmente en los países miembros de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico).

El gas producto del manejo de la basura en los rellenos sanitarios consiste principalmente de metano y CO_2 , el cual es el resultado del decaimiento de los desechos orgánicos. El metano tiene potencial como combustible, ya sea para generar electricidad, o como combustible para el transporte. Su recolección y uso además elimina la liberación en la atmósfera de un potente gas de efecto invernadero.

Se estima que para el año 2020, el mercado mundial de este tipo de proyectos será el equivalente a unos 5,500 MW, con lo cual se generarían alrededor de 22,000 fuentes de empleo directo, de los cuales cerca de unos 10,000 estarían en la actual Unión Europea. En términos monetarios, el valor de este mercado se estima de 1,000 a 2,000 millones de euros al año, de los cuales de 500 a 900 millones de euros serían invertidos en la Unión Europea.

Una forma de fermentación anaeróbica similar al gas generado en los rellenos sanitarios, pero producida bajo condiciones más controladas involucra la descomposición de los desechos orgánicos por una bacteria en un ambiente libre de oxígeno. Esta produce un gas rico en contenido de metano y que puede ser usado para generar calor y/o electricidad. El biogas resultante puede ser utilizado directamente en una caldera de gas modificada, o bien usado para hacer funcionar motores de combustión interna. El proceso además produce un digestor el cual puede ser separado en componentes líquidos y sólidos. El elemento líquido puede ser usado como fertilizante y el elemento sólido podría ser usado como un acondicionador del suelo o además procesado para producir una composta de mayor contenido orgánico.

El costo en la generación de electricidad a través de los desechos sólidos municipales y otras fuentes de biomasa es razonablemente aceptable cuando se compara con el de la energía eólica; y es mucho menor que el de las aplicaciones solares.

Ventajas de la biomasa

La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye al calentamiento global. De hecho, produce una reducción de los niveles atmosféricos del bióxido de carbono, ya que actúa como recipiente y el carbón del suelo puede aumentar con este hecho.

Los combustibles de biomasa tienen un contenido insignificante de azufre y por lo tanto no contribuyen a las emisiones de dióxido de azufre que causan la lluvia ácida. La combustión de la biomasa produce generalmente menos ceniza que la combustión del carbón, y la ceniza producida se puede utilizar como complemento del suelo en granjas para reciclar compuestos tales como fósforo y potasio.

La conversión de residuos agrícolas, de la silvicultura, y la basura sólida municipal para la producción energética es un uso eficaz de los residuos que a su vez reduce significativamente el problema de la disposición de basura, particularmente en áreas municipales.

La biomasa es un recurso doméstico, que no está afectado por fluctuaciones de precio a nivel mundial o a por las incertidumbres producidas por las fuentes de combustibles importados. En países en vías de desarrollo en particular, el uso de biocombustibles líquidos, tales como biodiesel y etanol, reduce las presiones económicas causadas por la importación de productos de petróleo.

Los cultivos para energía perennes (las hierbas y los árboles) tienen consecuencias para el medio ambiente más bajas que los cultivos agrícolas convencionales.

Restricciones en el uso de la biomasa

En naturaleza, la biomasa tiene relativamente baja densidad de energía y su transporte aumenta los costes y reduce la producción energética neta. La biomasa tiene una densidad a granel baja (grandes volúmenes son necesarios en comparación con los combustibles fósiles), lo que hace el transporte y su administración difíciles y costosos. La clave para superar este inconveniente está en localizar el proceso de conversión de energía cerca de una fuente concentrada de biomasa, tal como una serrería, un molino de azúcar o un molino de pulpa.

La combustión incompleta de la leña produce partículas de materia orgánica, el monóxido de carbono y otros gases orgánicos. Si se utiliza la combustión de alta temperatura, se producen los óxidos del nitrógeno. En una escala doméstica más pequeña, el impacto en la salud de la contaminación atmosférica dentro de edificios es un problema significativo en los países en vías de desarrollo, en donde la leña se quema ineficazmente en fuegos abiertos para cocinar y en la calefacción de ambientes.

Existe la posibilidad que el uso extensivo de bosques naturales cause la tala de árboles y escasez localizada de leña, con ramificaciones ecológicas y sociales serias. Esto está ocurriendo actualmente en Nepal, partes de la India, Sudamérica y en África. La conversión de bosques en tierras agrícolas y áreas urbanas es una importante causa de la tala de árboles. Además, en muchos países asiáticos gran parte del combustible de la madera usado con propósitos de energía provienen de áreas indígenas boscosas.

Hay un conflicto potencial por el uso de los recursos de la tierra y del agua para la producción de energía de biomasa y otras aplicaciones, tales como producción de alimentos y de fibras. Sin embargo, el uso de técnicas modernas de producción agrícola representa que hay suficiente tierra disponible para todas las aplicaciones, incluso en regiones densamente pobladas como Europa.

Algunos usos de la biomasa no son completamente competitivos en esta etapa. En la producción de electricidad por ejemplo, hay fuerte competencia de las nuevas plantas de gas natural, altamente eficientes. Sin embargo, la economía de la producción energética de biomasa está mejorando, y la preocupación cada vez mayor por las emisiones de gas de invernadero está haciendo a la energía de biomasa más atractiva.

La producción y el proceso de la biomasa pueden implicar un consumo de energía significativa, tales como combustible para los vehículos y los fertilizantes agrícolas, dando por resultado un balance energético reducido para el uso de la biomasa. En el proceso de la biomasa se necesitan reducir al mínimo el consumo de combustibles fósiles, y maximizan la conversión de basura y recuperación de energía.

A menudo existen restricciones políticas e institucionales al uso de biomasa, tales como políticas energéticas, impuestos y subsidios que animan el uso de combustibles fósiles. Los costos de la energía no reflejan a menudo las ventajas ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables.

➤ GEOTERMICA

La energía geotérmica es energía calorífica renovable producida en las profundidades del planeta. El calor ahí generado es llevado casi a la superficie por conducción térmica y por intrusión de la capa de magma originado a gran profundidad, esto ocurre en ciertas zonas volcánicas. Las manifestaciones geotérmicas se pueden observar fácilmente en géisers y en aguas termales, lo que sucede es que el agua de los mantos freáticos se calienta para formar recursos hidrotérmicos naturalmente, formando agua caliente y vapor. Los recursos hidrotérmicos son utilizados debido a la existencia de tecnología de perforación de pozos y conversión de energía para generar electricidad o para producir agua caliente para uso directo.

La energía de la Tierra, es extraída de la reserva subterránea a la superficie por medio de pozos de producción perforados a 2,000 m de profundidad con una temperatura en el fondo de 310 °C. El vapor es separado del líquido en naves especiales para la liberación de presión y alimenta a turbinas, que lo transforman en los generadores en electricidad. El fluido geotérmico extraído es inyectado nuevamente a partes de la periferia de la reserva para mantener presión en la misma. Si la reserva se va a utilizar para la aplicación de calor directo, el agua geotérmica es alimentada normalmente a su intercambiador de calor antes de ser inyectada de regreso a la tierra. El agua caliente, de la salida del intercambiador de calor, es utilizada para la calefacción de casas, invernaderos, para secado de vegetales, en lavanderías y en una gran variedad de usos alternos.

El agua caliente y el vapor existen en muchas locaciones de subsuelo del mundo. Muchos más recursos hidrotermales podrían ser utilizados si hubiera más tecnología disponible y si su desarrollo fuera promovido activamente por los gobiernos y la iniciativa privada.

Los usos de la energía geotérmica en nuestro país vienen desde 1956 con la implementación de la primera planta geotérmica en el estado de Hidalgo. Todos los desarrollos geotérmicos en México se encuentran bajo la responsabilidad de la Comisión Federal de Electricidad. Actualmente México cuenta con una capacidad de producción de 855 MW de los cuales 753 MW son generados en tres plantas geotérmicas: Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán y Los Humeros en Puebla, con lo que se ocupa el tercer lugar mundial después de Filipinas con 1,909 MW y USA, con 2,228 MW.

En Cerro Prieto, existen 9 unidades en operación en las Fases I, II y III. Las plantas se encuentran trabajando al 90%. La construcción de la fase IV comenzó en 1999 basadas en 4 unidades de 25 MW cada una y comenzaron su operación comercial en Octubre del 2000.

La energía geotérmica representa el 4% aproximadamente del total de la producción eléctrica en México. En la región norte de Baja California, en donde se encuentra Cerro Prieto, el porcentaje es de un 70%.

La energía geotérmica es un recurso doméstico, de bajo costo, confiabilidad y ventajas ambientales que superan a las formas de producción de energía convencionales. La energía geotérmica contribuye tanto a la generación de energía, produciendo electricidad como con usos directamente de calor, tanto como para reducir la demanda de energía, como con ahorros en electricidad y gas natural a través del uso de bombas geotérmicas tanto para calentar como para enfriar edificios. Solo una pequeña fracción de nuestros recursos geotérmicos son explotados hoy en día, muchos más podrían ser activados en el corto plazo con los incentivos apropiados. El uso de la energía hidrotérmica es económico y hay en varios sitios de alto grado. La piedra seca y caliente, el magma y la energía geotérmica presurizada en la tierra tienen un inmenso potencial.

➤ OCEÁNICA

Los mares y los océanos son inmensos colectores solares, de los cuales se puede extraer energía de orígenes diversos.

La radiación solar incidente sobre los océanos, en determinadas condiciones atmosféricas, da lugar a los gradientes térmicos oceánicos (diferencia de temperaturas) a bajas latitudes y profundidades menores de 1,000 metros.

La interacción de los vientos y las aguas provocan el oleaje y las corrientes marinas.

La influencia gravitacional de los cuerpos celestes sobre las masas oceánicas provoca mareas.

Energía de las mareas: La energía estimada que se disipa por las mareas es del orden de 22,000 teravatios por hora (TWH). de esta energía se considera recuperable una cantidad que ronda los 200 TWH.

El obstáculo principal para la explotación de esta fuente es el económico. Los costos de inversión tienden a ser altos con respecto al rendimiento, debido a las bajas y variadas cargas hidráulicas disponibles. Estas bajas cargas exigen la utilización de grandes equipos para manejar las enormes cantidades de agua puestas en movimiento. Por ello, esta fuente de energía es sólo aprovechable en caso de mareas altas y en lugares en los que el cierre no suponga construcciones demasiado costosas.

La limitación para la construcción de estas centrales, no solamente se centra en el mayor costo de la energía producida, si no, en el impacto ambiental que generan.

Energía térmica oceánica: La explotación de las diferencias de temperatura de los océanos ha sido propuesta multitud de veces, desde que el Biofísico d'Arsonval lo insinuara en el año 1881, pero el más conocido pionero de esta técnica fue el científico francés George Claudi, que invirtió toda su fortuna, obtenida por la invención del tubo de neón, en una central de conversión térmica.

La conversión de energía térmica oceánica es un método de convertir en energía útil la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua que se encuentra a 100 m de profundidad. En las zonas tropicales esta diferencia varía entre 20 y 24 °C. Para el aprovechamiento es suficiente una diferencia de 20 °C.

Las ventajas de esta fuente de energía se asocian a que es un salto térmico permanente y benigno desde el punto de vista medioambiental. Puede tener ventajas secundarias, tales como alimentos y agua potable, debido a que el agua fría profunda es rica en sustancias nutritivas y sin agentes patógenos. Las posibilidades de esta técnica se han potenciado debido a la transferencia de tecnología asociada a las explotaciones petrolíferas fuera de costa. El desarrollo tecnológico de instalación de plataformas profundas, la utilización de materiales compuestos y nuevas técnicas de unión harán posible el diseño de una plataforma, pero el máximo inconveniente es el económico.

Existen dos sistemas para el aprovechamiento de esta fuente de energía:

El primero consiste en utilizar directamente el agua de mar en un circuito abierto, evaporando el agua a baja presión y así mover una turbina. El Departamento de Energía Americano (DOE) está construyendo un prototipo de 165 KW en las islas de Hawái, con él, se pretende alcanzar la experiencia necesaria para construir plantas de 2 a 15 MW.

El segundo consiste en emplear un circuito cerrado y un fluido de baja temperatura de ebullición (amoníaco, freón, propano) que se evaporan en contacto con el agua caliente de la superficie. Este vapor mueve un turbogenerador, se condensa con agua fría de las profundidades y el fluido queda dispuesto de nuevo para su evaporación.

El inconveniente de este sistema es su bajo rendimiento, sobre un 7%, esto es debido a la baja temperatura del foco caliente y la poca diferencia de temperatura entre el foco frío y caliente. Además es preciso realizar un gasto extra de energía, empleado para el bombeo de agua fría de las profundidades para el condensado de los fluidos.

Energía de las olas: El calentamiento de la superficie terrestre genera viento, y el viento genera las olas. Únicamente el 0.01% del flujo de la energía solar se transforma en energía de las olas. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias sin muchas pérdidas de energía. Por ello, la energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental. De este modo la energía de las olas se concentra en las costas, que totalizan 336,000 Km de longitud. La densidad media de energía es del orden de 8 KW/m de costa. En comparación, las densidades de la energía solar son del orden de 300 W/m². Por tanto, la densidad de energía de las olas es, en un orden de magnitud, mayor que la que los procesos que la generan. Las distribuciones geográficas y temporales de los recursos energéticos de las olas están controladas por los sistemas de viento que las generan (tormentas, alisios, monzones).

La densidad de energía disponible varía desde las más altas del mundo, entre 50-60 KW/m en Nueva Zelanda, hasta el valor medio de 8 KW/m.

La tecnología de conversión de movimiento oscilatorio de las olas en energía eléctrica se fundamenta en que la ola incidente crea un movimiento relativo

entre un absorbedor y un punto de reacción que impulsa un fluido a través del generador.

De los sistemas propuestos, para aprovechar la energía de las olas, se puede hacer una clasificación, los que se fijan a la plataforma continental y los flotantes, que se instalan en el mar.

Uno de los primeros fue el convertidor noruego Kvaerner, cuyo primer prototipo se construyó en Bergen en 1985. Consistente en un tubo hueco de hormigón, de diez metros de largo, dispuesto verticalmente en el hueco de un acantilado. Las olas penetran por la parte inferior del cilindro y desplazan hacia arriba la columna de aire, lo que impulsa una turbina instalada en el extremo superior del tubo. Esta central tiene una potencia de 500 KW y abastece a una aldea de cincuenta casas.

El pato de Salter, que consiste en un flotador alargado cuya sección tiene forma de pato. La parte más estrecha del flotador se enfrenta a la ola con el fin de absorber su movimiento lo mejor posible. Los flotadores giran bajo la acción de las olas alrededor de un eje cuyo movimiento de rotación acciona una bomba de aceite que se encarga de mover una turbina.

La dificultad que presenta este sistema es la generación de electricidad con los lentos movimientos que se producen.

Balsa de Cockerell, que consta de un conjunto de plataformas articuladas que reciben el impacto de las crestas de las olas. Las balsas ascienden y descienden impulsando un fluido hasta un motor que mueve un generador por medio de un sistema hidráulico instalado en cada articulación.

Rectificador de Russell, formado por módulos que se instalan en el fondo del mar, paralelos al avance de las olas. Cada módulo consta de dos cajas rectangulares, una encima de la otra. El agua pasa de la superior a la inferior a través de una turbina.

Boya de Nasuda, consistente en un dispositivo flotante donde el movimiento de las olas se aprovecha para aspirar e impulsar aire a través de una turbina de baja presión que mueve un generador de electricidad.

➤ ENERGIA DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es el elemento químico gaseoso más abundante en el Universo, al quemarse sólo produce energía y agua por lo que es el combustible más limpio que existe. Sin embargo, no se le utiliza como tal, por el contrario tiene multiplicidad de usos no energéticos en la industria y se emplea de esta manera en grandes cantidades. El uso no energético de hidrógeno que se consume actualmente es alrededor de la quinta parte del consumo de gas natural mundial y se le obtiene a partir de la reformación de hidrocarburos fósiles. El hidrógeno es un portador de energía ya que puede producirse fácilmente a partir de la disociación del agua en electrolizadores y puede servir para almacenar energía, es fácilmente transportable y si es producido con fuentes renovables de energía tiene el potencial de formar un sistema energético prácticamente sin emisiones contaminantes. La disociación del agua puede llevarse a cabo en electrolizadores alimentados con celdas solares fotovoltaicas, generadores eólicos, pequeñas hidroeléctricas, geotérmicas, etc.

El hidrógeno también puede ser producido a partir de la gasificación de la biomasa, donde podría almacenarse el 75% de su contenido energético en forma de hidrógeno.

Otra forma novedosa de producción (el de bio-hidrógeno) en plena etapa de investigación se presenta a través de algas o bacterias que lo sintetizan al digerir residuos orgánicos, preferentemente agrícolas. El hidrógeno puede ser utilizado para generar electricidad directamente mediante la tecnología de celdas de combustible, donde paradójicamente el hidrógeno no se quema sino que se reduce químicamente en presencia de oxígeno produciendo una corriente eléctrica y agua.

La obtención y perfeccionamiento de tecnologías del hidrogeno ha recibido gran atención en los últimos tiempos y se le están dedicando a nivel mundial gran cantidad de recursos tanto a la investigación como a su desarrollo.

Desgraciadamente y es cuestionable que estos esfuerzos no estén mayoritariamente enfocados a la obtención de hidrógeno a partir de nuevas fuentes renovables de energía.

➤ ENERGÍA SOLAR

La radiación solar que se recibe en la superficie terrestre puede convertirse en calor, electricidad o energía mecánica mediante muy diversas tecnologías.

Potencial mundial: La energía solar es un recurso intermitente astronómica y climatológicamente, su intensidad varía en el transcurso del día debido a la rotación de la Tierra sobre su eje en 24 horas y también a lo largo del año debido a la traslación de la Tierra alrededor del Sol en 365.4 días. La intermitencia climatológica se debe sobre todo a la nubosidad, lo que impide la captación de la luz solar directa, pero permite la difusa.

La energía solar que se recibe en un día en un cuadrado de 28 Km de longitud por lado situado en el desierto de Sonora, y cubierto de celdas solares fotovoltaicas de un 10% de eficiencia, satisfaría la demanda promedio diaria actual de energía eléctrica de todo México (550 GWh/día).

La energía solar, puede utilizarse mediante diversas tecnologías para secado de productos agrícolas, refrigeración de productos perecederos, desalinización de agua y calentamiento de fluidos (agua, aceites, aire, etc.). Según su uso a éstos se les clasifica en sistemas activos o sistemas pasivos. Los sistemas pasivos son los que no necesitan partes mecánicas móviles para su funcionamiento, y se utilizan principalmente en la climatización de edificaciones y viviendas. Los sistemas activos son los que requieren de artefactos o mecanismos captadores donde se aprovecha la radiación solar para calentar un fluido de trabajo. Dependiendo de la temperatura a la que se necesite calentar el fluido, los sistemas fototérmicos activos pueden concentrar o no la radiación solar. Los sistemas de generación eléctrica solares pueden usar la parte térmica, la parte luminosa o ambas para producir electricidad dependiendo de la tecnología. Los sistemas que utilizan exclusivamente la térmica lo hacen a través de concentración óptica de la radiación solar en un punto o en una línea. Los sistemas que aprovechan exclusivamente la energía luminosa son los que utilizan celdas fotovoltaicas para convertir la luz directamente en energía eléctrica. A continuación se describen las tecnologías correspondientes.

Sistemas Fotovoltaicos

Las celdas fotovoltaicas son placas fabricadas principalmente de silicio. Cuando a este elemento se le añaden cantidades relativamente pequeñas de ciertos

materiales con características muy particulares, obtiene propiedades eléctricas únicas en presencia de la luz solar: los electrones son excitados por los fotones asociados a la luz y se mueven a través del silicio produciendo una corriente eléctrica; este efecto es conocido como fotovoltaico.

Dado que la intensidad máxima de radiación solar en la superficie terrestre es de poco más de 1000 W/m^2 y que la eficiencia de conversión de estos sistemas es de alrededor de 15%, un metro cuadrado puede proveer 150 Watts, potencia suficiente para operar un televisor mediano.

Para que los sistemas que funcionan con celdas fotovoltaicas provean energía eléctrica en las noches, requieren de baterías donde se acumula la energía eléctrica generada durante el día, lo cual encarece su aplicación. Sin embargo, en la actualidad se están desarrollando sistemas fotovoltaicos conectados directamente a la red eléctrica, para evitar así el uso de baterías, por lo que la energía que generan se usa de inmediato por el propio usuario, con la posibilidad, en algunos países, de vender los excedentes de electricidad a las compañías generadoras.

Un Sistema Fotovoltaico es un generador de electricidad que satisface cualquier patrón de consumo requerido para una carga específica, en función del patrón de insolación disponible en un lugar en particular. Su complejidad depende de las características de la carga. Según la forma de electricidad entregada los sistemas fotovoltaicos se dividen en sistemas de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CD).

Aplicaciones

Usualmente, las aplicaciones en que los Sistemas Fotovoltaicos solían representar la mejor opción técnico-económica eran para satisfacer los requerimientos energéticos en lugares remotos: iluminación doméstica, bombeo de agua, alumbrado público, TV rural, esterilización de agua para uso doméstico, equipos de telemetría, radiotelefonía rural, señalización y telecomunicación en carreteras, estaciones repetidoras, refrigeración de vacunas y medicinas, boyas y plataformas marinas, campismo, protección catódica y equipos electrónicos de baja potencia, entre otros. Sin embargo, actualmente, estos sistemas se han vuelto una opción viable en las ciudades para alumbrado en parques públicos, suministro de energía a teléfonos de emergencia, fachadas de edificios, celdas con forma de teja para casas, y plantas

de generación de electricidad distribuida (centrales conectadas a la red) y para horas pico diurnas.

Esto ha sido posible gracias a que la tecnología de celdas fotovoltaicas ha evolucionado reduciendo sus costos por Watt instalado, éstos han disminuido de 210 dólares a principios de los años 80 hasta 6 dólares actualmente, y la tendencia sigue hacia una mayor disminución en un futuro cercano.

Mundialmente, a partir de 1998 se han producido e instalado alrededor de 3,000 MW fotovoltaicos, a una tasa promedio de crecimiento anual de 23%. En el año 2003 se produjeron 744.1 MW aumentando la producción del año anterior en 32.4%

Colector Solar para agua

Colector Solar Plano: Es el dispositivo fototérmico posiblemente más empleado en el mundo para calentamiento de fluidos se le denomina colector solar plano o simplemente colector solar. Se trata de una tecnología madura, en etapa de comercialización masiva, que se utiliza para el aprovechamiento de calor a temperaturas menores a 100 °C.

Un colector solar plano, es un intercambiador de calor por radiación, que consiste en una superficie plana metálica, o absorbedor, fabricado usualmente de cobre, cuya superficie expuesta al sol es oscurecida con pintura negra o un recubrimiento selectivo para aumentar su absorción de radiación térmica solar directa y difusa. También consta de un arreglo de tubos soldados al absorbedor. La configuración más frecuente de absorbedor se caracteriza por dos tubos distribuidores, uno para el agua fría de entrada y otro para el agua caliente de salida; estos tubos se unen entre sí por tubos transversales de menor diámetro provistos de "aletas" que consisten en una lámina de cobre, preferentemente soldada a lo largo de cada uno, y cuyo objetivo es aumentar la superficie expuesta a la radiación, Este conjunto se coloca en una caja con material aislante por debajo del absorbedor y uno o dos vidrios planos por delante del mismo.

La radiación solar capturada provoca que la superficie plana del absorbedor (aletas) se caliente y transmita calor por conducción a los tubos soldados a la misma. Por el interior de los tubos circula agua cuya temperatura se incrementa al entrar en contacto con ellos. La cubierta de vidrio reduce las

pérdidas de calor por convección del absorbedor, y al mismo tiempo permite el paso de prácticamente toda la radiación solar que incide en el colector, creando un efecto invernadero con el absorbedor.

Este colector solar plano se acopla con un recipiente aislado térmicamente para el almacenamiento de agua caliente, al que se le llama comúnmente “termotanque”, para formar un calentador solar de agua. Cuando la diferencia entre la altura de la parte superior del colector y la parte inferior del termotanque es la adecuada, (entre 30 y 50 cm.), y además se cuenta con una instalación hidráulica que mantenga llenos ambos dispositivos, se establece una circulación del agua por convección natural entre el colector y el termotanque, lo que se conoce como “efecto termosifónico”. El agua calentada por el sol, al ser más ligera que el agua fría, sube del colector y se almacena en la parte superior del termotanque. Simultáneamente, el agua fría del termotanque, se desplaza hacia la parte inferior del colector para calentarse a su vez, es decir, se establece un ciclo convectivo, en el cual el agua se recircula sin necesidad de bombeo mecánico en localidades donde no se presentan temperaturas abajo de cero grados Celsius.

Sistemas Fototérmicos de Concentración

Estos sistemas se obtienen cuando la radiación solar directa se refleja y se concentra en un punto, una línea o un plano, el aumento de energía en el área focal es directamente proporcional a la concentración, y la temperatura puede aumentar desde cientos de grados Celsius hasta miles en casos especiales.

La aplicación más extensa de sistemas de concentración solar se da en la producción de electricidad fototérmica mediante plantas solares termoeléctricas donde la radiación absorbida calienta un fluido térmico (aceite o sal fundida). Este calor puede ser subsecuentemente utilizado para impulsar motores tipo Stirling o turbinas de vapor que a su vez impulsan a generadores de electricidad por inducción.

Hasta la fecha se han desarrollado tres tecnologías diferentes de generación solar fototérmica: las plantas de concentración mediante canal parabólico, donde superficies reflectoras en forma de parábola enfocan la radiación en una línea donde se encuentra un tubo absorbedor que lleva en su interior un aceite térmico. El aceite térmico puede llegar a calentarse hasta 350-400 °C, luego, en un intercambiador de calor se produce vapor a alta presión el cual alimenta a

una turbina de vapor convencional. Actualmente en California, Estados Unidos se encuentran en funcionamiento nueve plantas con una capacidad instalada conjunta de 354 MW desde hace más de 10 años. La Tecnología Solar de la Torre Central consiste de un gran arreglo de espejos movibles que siguen el movimiento del sol y enfocan su radiación en un receptor instalado en lo alto de una torre, donde el fluido de transporte de calor (agua, sal o aire) es calentado entre 500 y 1,000 °C. debido a las altas temperaturas esta energía puede ser acoplada directamente a una turbina de gas o a una planta de ciclo combinado. Se han propuesto plantas de 200 MW de capacidad y construido plantas piloto de 80 MW.

Finalmente, la tecnología de plato parabólico utiliza espejos parabólicos y tienen un mecanismo de seguimiento solar. Estos dispositivos concentran la radiación solar en el foco donde se encuentra un absorbedor con un fluido térmico el cual se calienta y puede llegar a temperaturas en el rango de 600 a 1,200 °C. Estos sistemas son usualmente pequeños (10 KW de capacidad nominal), por lo tanto son convenientes para aplicaciones descentralizadas.

Se han desarrollado sistemas de almacenamiento mediante el uso de aceites térmicos y sales fundidas que pueden llegar a almacenar calor durante días, brindándole la confiabilidad necesaria al sistema de generación eléctrica para que funcione sin una planta de respaldo convencional.

Cuando sea necesario, también puede actuar como una planta de respaldo que funcione con biocombustibles, esto permitiría el funcionamiento de grandes centrales eléctricas (más de 100 MW) que únicamente utilicen energías renovables. Estas plantas también pueden operar para generar electricidad mediante el aprovechamiento del calor de desecho, por ejemplo, para la desalinización de agua, o para uso industrial de calor de alta temperatura. Con estos sistemas de cogeneración, la eficiencia en la captación de la energía solar puede llegar a ser del 85%

Aplicaciones y Beneficios de los Sistemas Fototérmicos

Los colectores solares planos se utilizan para el calentamiento de agua en el sector doméstico, recreativo calentando agua para albercas, precalentamiento de agua en el sector industrial y en servicios como hospitales, hoteles y balnearios. También se usan para calentar otros fluidos como aceites térmicos, aire y gases de alto peso molecular. Asimismo, para el secado de madera y otros

productos agroforestales, acondicionamiento de aire, calefacción ambiental y refrigeración.

Los calentadores y las plantas termoeléctricas solares son ambientalmente benignos siempre y cuando se utilicen materiales amigables con el medio ambiente para la transferencia de calor. En regiones muy soleadas las plantas tipo torre central y las de canal parabólico son las que mejor relación costo beneficio han mostrado con respecto a otras formas de generación solar de electricidad.

PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Para efectos de ingeniería es necesario conocer algunos fenómenos como son las fases de una sustancia simple. Sólida, líquida y gaseosa que están relacionadas con sus contenidos de energía. En la fase sólida, las moléculas o átomos están muy cercanos, dando con esto su rigidez. En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez. En la fase gaseosa, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que puede permanecer en cualquier parte de un lugar cerrado.

También se ha establecido que, donde quiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra en esa transición, una gran cantidad de energía.

Mecanismos de Transferencia de Calor

Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de una fuente a un receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres procesos. Estas son: **conducción, convección y radiación.**

Conducción: es la transferencia de calor a través de un material fijo, es decir, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura dt que impulsa el calor a través de la pared de espesor dx . La constante de proporcionalidad k es perpendicular a la conducción de calor por conductividad y se le conoce como conductividad térmica.

La conductividad es evaluada experimentalmente y básicamente está definida por:

$$dQ = kA \left(- \frac{dt}{dx} \right) \quad BTU/hr$$

El término $-\frac{dt}{dx}$ es llamado gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supuso una temperatura mayor a la cara de la pared en donde $x = 0$ y menor en la cara donde $x = X$, A , representa el área de la pared.

Es decir, en otras palabras la dirección de flujo de calor será con ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico.

La conductividad térmica de los sólidos tiene un amplio rango de valores numéricos dependiendo de si el sólido es relativamente un buen conductor de calor tal como un metal o un mal conductor como el asbesto. Estos últimos sirven como aislantes aún cuando la conducción de calor se asocia usualmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, pero también es aplicable a gases y a líquidos, con sus limitaciones.

Convección: es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla. Imagine que un recipiente con un líquido se coloca sobre una llama caliente. El líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica. El líquido adyacente al fondo también es menos denso que la porción superior fría y asciende a través de ella, transmitiendo su calor por medio de mezcla conforme asciende.

La transferencia de calor de líquido caliente que va del fondo del recipiente al resto, es llamada convección natural o convección libre. Si se produjera cualquier otra agitación, tal como la provocada por un agitador el proceso es conocido como convección forzada. Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación que imita la forma de la ecuación de conducción y está dada por:

$$dQ = hAdt$$

Cuando esta ecuación es escrita en su forma integrada da como resultado:

$$Q = hA \Delta t$$

A esto se le conoce como la ley del enfriamiento de Newton.

Radiación: involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía la absorbe el receptor y parte es reflejada por él. Basándose en la segunda ley de la termodinámica, Boltzmann, estableció que la velocidad a la cual una fuente da calor es:

$$dQ = \sigma \epsilon dA T^4$$

Esta ecuación se le conoce como la ley de la cuarta potencia, en donde T es la temperatura absoluta, σ es una constante dimensional, ϵ es un factor perpendicular a la radiación llamado emisividad. La emisividad, igual que la conductividad térmica k o el coeficiente de transferencia de calor h , debe también determinarse experimentalmente.

Todos los mecanismos de transferencia de calor por conducción como por convección requieren un medio para la propagación de energía. Sin embargo, el calor puede también propagarse aún en el vacío absoluto mediante radiación. Puede decirse que a una temperatura dada, todos los cuerpos emiten radiación en forma de energía electromagnética, en diferentes longitudes de onda, siendo la radiación dependiente de la temperatura absoluta del cuerpo y de sus características superficiales. Sin embargo, solo aquella fracción que se encuentra en el rango de longitudes de onda de 0.1 a 100 micrones aproximadamente, se considera como radiación térmica. Dentro de este intervalo del espectro electromagnético se localiza, el rango ultravioleta, el visible y el infrarrojo.

Un radiador perfecto o cuerpo negro es aquel que emite energía radiante de su superficie a una razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia.

En conclusión, la transferencia de calor se entiende como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y receptores, tratados usualmente de manera independiente. Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las razones de intercambio térmico, tales como los que ocurren en equipos de transferencia de calor, tanto en ingeniería mecánica como en los procesos químicos, este enfoque realza la importancia de las diferencias de temperatura entre la fuente y el receptor, lo que hace después de todo, el potencial por el cual la transferencia de calor se lleva a efecto.

La transferencia de calor considera un intercambio en un sistema. La pérdida de calor por un cuerpo deberá ser igual al calor absorbido por el otro dentro de los confines del mismo sistema.

2.1 CONDUCCION

Los fundamentos de la conducción de calor fueron establecidos hace más de un siglo siendo atribuidos generalmente a Fourier. En muchos sistemas que involucran flujo, tal como, flujo de calor, flujo de fluido o flujo de electricidad se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema, es decir:

$$\text{Flujo} \propto \frac{\text{diferencia de potencial}}{\text{resistencia térmica}} \quad (2.1.1)$$

En el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a efecto por la diferencia de temperatura entre las superficies calientes y frías. Recíprocamente de la ecuación 2.1.1, cuando dos superficies de una pared están

a diferente temperatura, necesariamente existe un flujo y una resistencia al flujo de calor. La conductancia es la reciproca de la resistencia al flujo de calor, y puede expresarse como:

$$\text{Flujo} \propto \text{conductancia} \times \text{potencial} \quad (2.1.2)$$

Para hacer la ecuación (2.1.2) una igualdad, la conductancia debe de evaluarse de tal manera, que ambos lados sean dimensional y numéricamente correctos. Es decir, suponiendo que una cantidad medida de calor Q' (BTU) ha sido transmitida por una pared de tamaño desconocido en un intervalo de tiempo θH con una diferencia de temperatura medida Δt °F. Escribiendo la ecuación 2.1.2 obtenemos:

$$Q = \frac{Q'}{\theta} = \text{conductancia} \times \Delta t \quad (\text{Btu}/\text{hr}) \quad (2.1.3)$$

La conductancia la cual sus dimensiones son BTU/(hr)(°F) es una propiedad ponderable de toda la pared, aún cuando experimentalmente se ha encontrado que el flujo de calor está independientemente influido por el grosos y el área de la misma. Ésta conductancia obtenida anteriormente no es útil, ya que es aplicable únicamente a una pared experimental.

Cuando la conductancia se reporta para una cantidad de material de un pie de grueso con un área de flujo de un pie², la unidad de tiempo 1h y la diferencia de temperatura 1 °F, es llamada conductividad térmica k.

Las correlaciones entre la conductividad térmica y la conductancia de una pared de grueso L y área A, están dadas por:

$$\text{conductancia} = k \frac{A}{L} \quad (2.1.4)$$

$$Q = k \frac{A}{L} \Delta t \quad (2.1.5)$$

Líquidos y Gases

Existen grandes dificultades para determinar las conductividades de líquidos y gases sin embargo el método más exacto para determinarla es el de Bridgman y Smith, que consiste en un tubo capilar entre dos cilindros de cobre, sumergidos en un baño a temperatura constante, como se muestra en la figura (2.1.a). El calor suministrado al cilindro interior por la resistencia, fluye a través de la película al cilindro exterior, donde es eliminado por el baño. Este aparato, a través del uso del depósito asegura que el tubo capilar este lleno de líquido, siendo este también adaptable a gases. La película es de 1/64 de pulgada de grueso, y la diferencia de temperaturas se mantiene muy reducida.

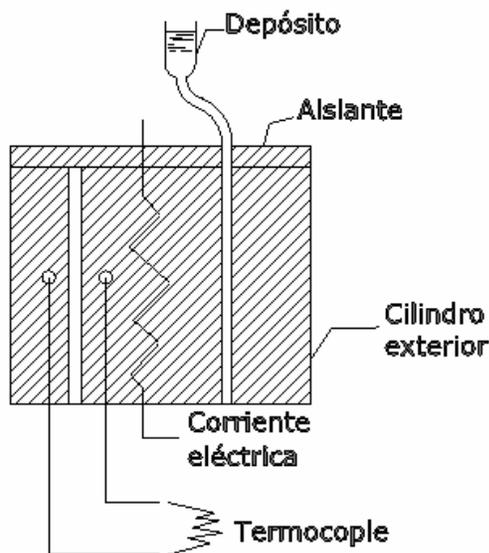


Fig.(2.1.a) Aparato para la conductividad líquida

La conductividad térmica de los sólidos es mayor que la de los líquidos, la que a su vez, es mayor que la de los gases. Es más fácil transmitir calor de un sólido que a través de un líquido que por un gas. Algunos sólidos como los son los metales, tienen altas conductividades térmicas y son llamados conductores,

mientras que otros con bajas conductividades térmicas, es decir, malos conductores de calor son llamados aislantes.

Las conductividades de los sólidos pueden, ya sea aumentar o disminuir con la temperatura, y en algunos casos puede hasta invertir su velocidad de cambio de una disminución a un incremento. En algunas ocasiones en las que se puede enfrentar a problemas prácticos no hay necesidad de introducir un factor de corrección para la variación de la conductividad térmica con la temperatura. Sin embargo, la variación puede usualmente expresarse por la ecuación lineal:

$$k = k_0 + \gamma t \quad (2.1.6)$$

En donde k_0 en $^{\circ}\text{F}$ es la conductividad y γ es una constante que denota el cambio en la conductividad por grado de cambio en la temperatura. La conductividad para niveles líquidos decrece cuando la temperatura aumenta, aunque el agua es una excepción notable. Para todos los gases y vapores comunes, se presenta un incremento con el aumento en la temperatura, al parecer la influencia de la presión en la conductividad de los sólidos y líquidos es despreciable, y los datos reportados sobre gases son muy inexactos debido a los efectos de convección libre y radiación, que no permite hacer generalizaciones.

A partir de la teoría cinética de los gases, se puede concluir que la influencia de la presión deberá ser pequeña, excepto a vacíos muy lejanos.

La naturaleza de la unión formada entre la fuente de calor y el fluido o espécimen sólido que hace contacto con él y transmite el calor, es uno de los factores que origina error en la determinación de la conductividad térmica.

Un enfoque alternativo para determinar la ecuación general de conducción en estado estable, consiste en encontrar el flujo de calor y luego la distribución de temperatura, ya que se tienen condiciones de estado estacionario y Q es constante, se parte de la ecuación de Fourier para la pared plana:

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1.7)$$

Puesto que k y A son constantes, encontramos que la integración sobre todo el dominio de valores de x y T es:

$$Q \int_0^L dx = -kA \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$QL = -kA (T_2 - T_1)$$

O bien

$$Q = \frac{kA (T_1 - T_2)}{L}$$

Existen dos cantidades de intereses en el estudio de los problemas de conducción de calor. Dichas cantidades son la razón de flujo de calor y la distribución de temperatura. Las demandas de flujo de calor tratan de la demanda de energía en un sistema dado cuando se requiere una distribución de temperaturas conveniente para diseñar de manera adecuada el sistema, desde el punto de vista de los materiales. En cualquier caso o suceso una vez conocida, la distribución de la temperatura es posible determinar las razones de flujo de calor con ayuda de la denominada ley de Fourier.

Además del problema de la pared plana, existen otros dos problemas básicos unidimensionales de estado estacionario que se deben considerar: dichos problemas son el caso de un cilindro hueco tan largo que las pérdidas en los extremos son despreciables, o bien que sus extremos se encuentren aislados para evitar pérdidas. Y el caso de una esfera hueca. En ambos casos, la

temperatura de la superficie interior y exterior se mantiene constante. Considerando una esfera hueca, como se muestra en la figura 2.1.b

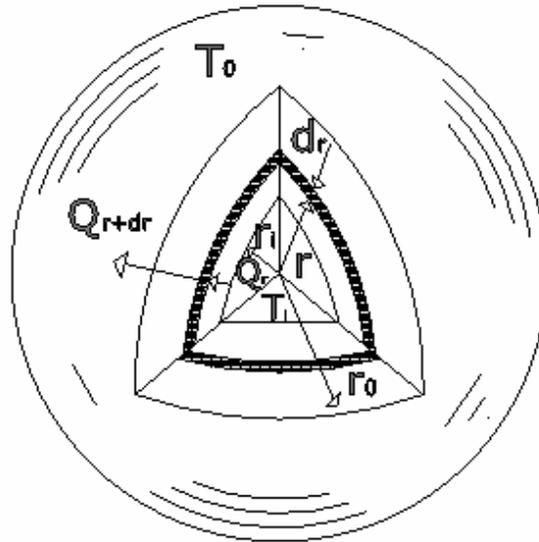


Fig. (2.1.b) Conducción de calor a través de una esfera hueca

Se inicia con un balance de energía en un elemento diferencial de volumen, con el fin de determinar la ecuación diferencial apropiada. Sabiendo que la conducción térmica es constante en condiciones de estado estacionario y que no existen fuentes de calor tenemos:

$$Q_r = \frac{d}{dr} (Qr) dr$$

Es posible escribir la derivada ordinaria $\left(\frac{d}{dr}\right)(Qr)$ ya que la temperatura es función únicamente de r (ósea que se tiene una sola variable independiente, r)

La cantidad, Q_r , está dada por:

$$Q_r = -KA_r \frac{dT}{dr}$$

Donde:

$$A_r = 4\pi r^2$$

El área A_r que aparece en la ecuación anterior no es una constante si no una función de r .

Ahora bien, k es una constante diferente de cero y dr no puede tener el valor de cero. Además la superficie del área esférica, A_r está dada por $4\pi r^2$, y el balance de energía se puede escribir en la forma:

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.1.8)$$

La ecuación anterior es la ecuación diferencial apropiada para la distribución de temperatura en una esfera hueca.

Utilizando la ecuación de Fourier para determinar la ecuación de la razón del flujo de calor tenemos:

$$Q = -kA_r \frac{dT}{dr}$$

Sustituyendo Ar , se obtiene:

$$Q = -4\pi kr^2 \frac{dT}{dr}$$

Sabiendo que Q es constante (en estado estacionario) la ecuación anterior se puede integrar para obtener:

$$Q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r^2} = -4\pi k \int_{T_i}^{T_o} dT$$

Y así obtenemos:

$$-Q \left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{r_i} \right) = -4\pi k (T_o - T_i)$$

O bien:

$$-Q \left(\frac{r_i - r_o}{r_o r_i} \right) = -4\pi k (T_o - T_i)$$

Obtenemos:

$$Q = \frac{4\pi r_o r_i k (T_i - T_o)}{r_o - r_i} \quad (2.1.9)$$

Que es la ecuación que nos da la razón de flujo de calor que pasa a través de la esfera hueca.

En el caso de conducción en un cilindro hueco en condiciones de estado estacionario. Puede analizarse en forma semejante a la de una esfera hueca.

La figura 2.1.c muestra un cilindro hueco y largo:

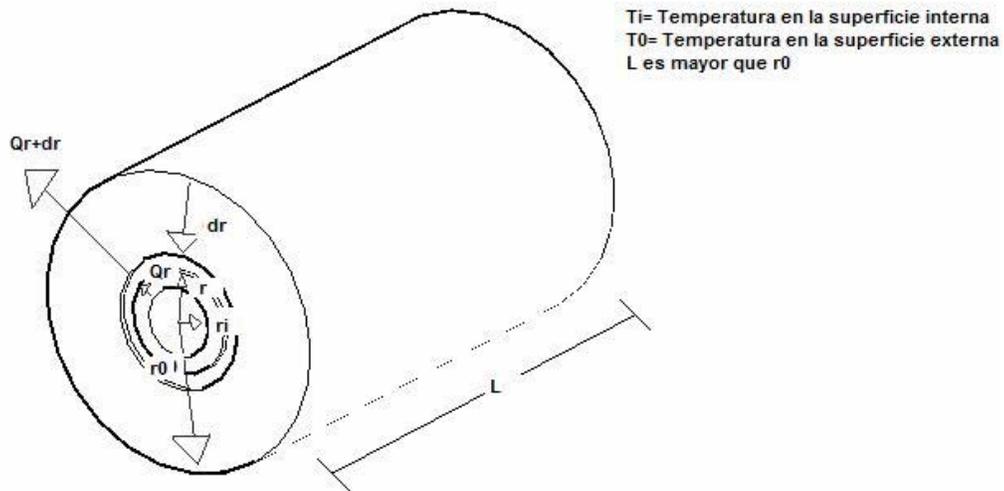


Fig (2.1.c) Conducción de calor radial a través de un cilindro hueco

Tomando en cuenta que la conductividad térmica es constante en estado estacionario y no existiendo fuentes de calor, se procede con un balance de energía

$$Qr = \frac{d}{dr}(Qr) dr$$

Qr está dada por:

$$Qr = -kAr \frac{dT}{dr}$$

Donde

$$Ar = 2\pi rL$$

Procediendo como en el caso de la esfera hueca se llega al conjunto de ecuaciones:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.1.10)$$

En:

$$r = r_i , \quad T = T_i$$

$$r = r_o , \quad T = T_o$$

La solución de esta ecuación es:

$$T(r) = T_i - (T_i - T_o) \frac{\ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (2.1.11)$$

Partiendo de la ecuación de Fourier para calcular la razón de flujo de calor del cilíndrico hueco:

$$Q = -kAr \frac{dT}{dr}$$

Sabiendo que el área de la superficie cilíndrica A_r está dada por $2\pi rL$, se procede a separar las variables:

$$Q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -2\pi kL \int_{T_i}^{T_o} dT$$

Este cálculo de la integral nos lleva a la siguiente ecuación:

$$Q \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) = -2\pi kL(T_o - T_i)$$

O bien:

$$Q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (2.1.12)$$

Que es la ecuación para determinar la razón de flujo de calor para el cilindro hueco.

Sistema de Aletas

Las aletas o superficies extendidas son utilizadas con el fin de incrementar la razón de transferencia de calor de una superficie y con ello aumentar el área total disponible para la transferencia de calor.

En el análisis y diseño de una superficie con aletas, la cantidad de energía calorífica por una sola aleta de un tipo geométrico dado, es determinada

auxiliándonos del gradiente de temperatura y el área transversal disponibles para el flujo de calor en la base de la aleta.

Usualmente se usa una superficie con aletas cuando el fluido convectivo participante es un gas, ya que los coeficientes convectivos de transferencia de calor para gases son usualmente menores que los de un líquido.

Las aletas de secciones transversales y rectangulares como tiras que se anexan a lo largo de un tubo, son llamadas aletas longitudinales.

Aletas de sección transversal variable.

En numerosas ocasiones, dependiendo de las limitaciones que se tengan (espacio, materiales, peso, etc.) conviene utilizar las aletas de sección transversal variable, ya sea que la sección transversal de la aleta prismática cambie en la dirección del flujo de calor o porque se trate de una aleta adherida a una pared cilíndrica. En tales casos, el análisis de la conducción de calor se complica al tenerse dos variables adicionales. El área de sección transversal y el área lateral de la aleta.

Conducción de calor en estado transitorio

Un aspecto de suma importancia en el estudio de los fenómenos de transmisión de calor lo constituye, sin duda, el posible cambio en el tiempo y la temperatura en varios o todos los puntos del sistema.

Son innumerables los ejemplos y situaciones de esta naturaleza que se presentan en la práctica de la ingeniería: calentamiento o enfriamiento de productos durante su manufactura, acondicionamiento del medio ambiente para fines industriales o de confort humano, refrigeración y tratamiento de productos alimenticios, etc. basta pensar en aquellos casos en el que un sistema pasa de un estado de equilibrio térmico a otro, o bien, en aquellas situaciones en que el sistema queda expuesto a variaciones continuas impuestas por algún agente externo; en ambos casos se tiene como aspecto importante que la temperatura cambia con el tiempo.

En el caso de la conducción de calor, los problemas denominados de estado transitorio o no permanente surgen típicamente cuando las condiciones de

frontera del sistema bajo estudio cambian y, constituyen un reflejo de las variaciones que sufren los medios externos al sistema.

El resultado es que la temperatura de todos los puntos cambia con el tiempo, hasta alcanzar una distribución de estado permanente correspondiente a la nueva situación de equilibrio con el ambiente al que se esté expuesto.

La respuesta que ofrece un sistema bajo análisis depende de las características que tengan los cambios en las condiciones externas a las cuales está sujeto el sistema.

Las propiedades térmicas de difusión y almacenamiento del calor del sistema, así como de su forma geométrica y de sus dimensiones, determinará la rapidez con la que el sistema responda a los cambios externos, dando lugar a un comportamiento diferenciado para cada uno de sus elementos.

Es necesario reconocer que no existen materiales que posean una conductividad térmica infinitamente grande, sin embargo numerosos sistemas pueden considerarse en la práctica como si tuvieran una resistencia térmica a la conducción despreciable, y aceptar, por lo tanto que la temperatura en todos los puntos del sistema es esencialmente uniforme en un instante dado.

Lo anterior constituye, una idealización sumamente útil que para transmitir calor por conducción hacia o desde un sistema siempre se necesita un gradiente de temperatura. La simplificación permite la obtención de resultados muy cercanos a la realidad en aquellos casos en que la resistencia térmica interna del sistema es muy pequeña, comparada con la resistencia térmica externa que ofrece el medio ambiente en inmediato contacto con la superficie exterior del sistema bajo estudio.

Esto generalmente resulta cierto cuando se cumple con las siguientes condiciones:

- a) El sistema es de pequeñas dimensiones
- b) La capacidad térmica del sistema es baja
- c) La conductividad térmica del sistema es alta

- d) El coeficiente de transferencia de calor entre el sistema y el medio externo es bajo

2.2 CONVECCION

La convección es el proceso mediante el cual se transfiere calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento adyacente a ella. En general, la velocidad media más grande de un fluido es la razón de transferencia de calor convectiva más grande para una diferencia de temperatura prescrita entre el fluido y la frontera sólida. Es de mencionar que en la adición a la magnitud de velocidad, el modelo de movimiento del flujo también afecta las características de transferencia de calor.

En necesario mencionar aspectos fundamentales relacionados con el estudio de la transferencia de calor por convección.

Medio continuo

Las moléculas individuales que forman el fluido son ignoradas ya que este consiste en materia continua. En cada punto del espacio ocupado por este fluido continuo existe un valor único para la velocidad, la presión, la densidad, etc.; es decir, se acepta que las variables y propiedades del fluido son variables continuas del espacio o variables de campo. De esta manera es posible emplear herramientas tan convenientes como el cálculo vectorial y obtener ecuaciones diferenciales, que describen las variaciones con respecto al espacio y al tiempo, de las diferentes variables a considerarse, así como los principios generales de conservación y balance antes señalados. Solo que es necesario, al emplear el concepto de medio continuo, que la trayectoria libre media de las moléculas sean muy pequeña comparado con la más pequeña dimensión de longitud presente en el análisis.

Presión

La presión en un punto se define como el esfuerzo, fuerza por unidad de área, que actúa perpendicularmente sobre una superficie sumergida en el fluido, es decir:

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (2.2.1)$$

Observando que la expresión anterior sería difícil hacer corresponder con la realidad sino tuviera en cuenta el concepto de medio continuo. Se ha demostrado al estudiar los fluidos en reposo que la presión en un punto de un fluido estático es independiente de la orientación que tenga la superficie sobre la cual actúa.

Masa y densidad de un fluido

La cantidad de un fluido bajo estudio se puede caracterizar mediante su masa al igual que todos los cuerpos y sustancias simples. Sin embargo, debido a las características propias de los fluidos, generalmente resulta más conveniente utilizar la propiedad conocida como densidad. Esta es definida de manera general como la masa de fluido contenida en la unidad de volumen. La manera más formal de definir la densidad es:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2.2.2)$$

Expresión que carecería de sentido físico si antes no es aceptada la hipótesis que un fluido es un medio continuo. La densidad, entonces, constituye una variable continua del espacio. Y, al igual que la temperatura y la presión, puede cambiar de un punto a otro.

Gasto másico y gasto volumétrico

El gasto másico, es un importante concepto cinemático que se emplea en el estudio de los fluidos. Este se define como la masa que por unidad de tiempo atraviesa una superficie imaginaria en el campo de flujo.

Para representar matemáticamente el gasto másico es necesario tomar en cuenta la naturaleza vectorial de la velocidad del flujo y de la orientación que cualquier superficie tenga con respecto a un sistema de coordenadas; así mismo, es necesario considerar que las propiedades del fluido cambien de un punto a otro en la superficie.

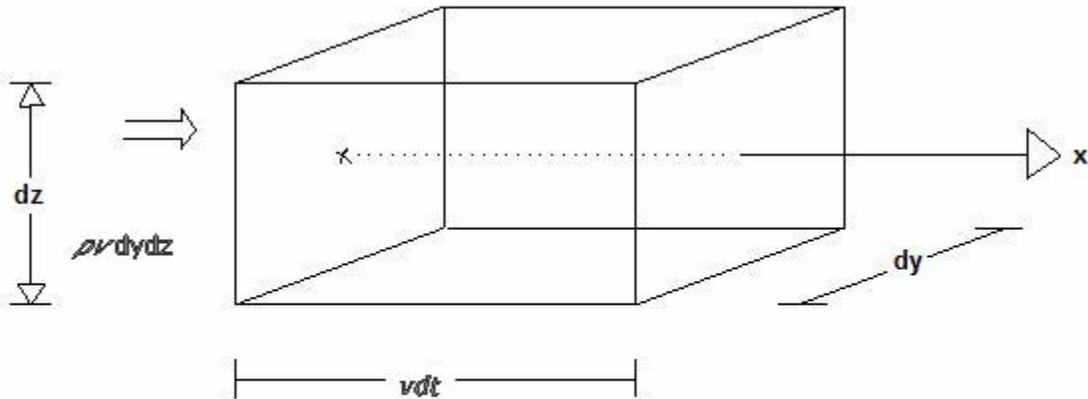


Fig. (2.2.a) Gasto másico a través de un elemento de superficie.

La figura 2.2.a se trata de un elemento diferencial de superficie $dy dz$ perpendicular a la dirección "x", a lo largo de la cual fluye un fluido de densidad " ρ " y velocidad " v ". Así el volumen del fluido dV que ha pasado a través del elemento del área $dy dz$ en un intervalo de tiempo dt se expresa como:

$$dV = v dt dy dz \quad (2.2.3)$$

Si este volumen es multiplicado por la densidad del fluido, se obtiene la masa que ha cruzado a través del elemento en el mismo lapso de tiempo, pudiendo expresar para el gasto másico:

$$m = \rho \frac{d\Delta}{dt} = \rho v dy dz \quad (2.2.4)$$

Cuando la densidad del fluido es constante el gasto volumétrico se obtiene al considerar directamente al ecuación 2.2.3, es decir:

$$Q = \frac{dV}{dt} = v dy dz \quad (2.2.5)$$

En el caso de una superficie no diferencial, perpendicular a la dirección del flujo, se tendría de acuerdo con el párrafo anterior:

$$m = \int \rho v dy dz \quad (2.2.6)$$

Y

$$Q = \int v dy dz \quad (2.2.7)$$

Respectivamente las relaciones se reducen a:

$$m = \rho v A \quad (2.2.8)$$

Y

$$Q = vA \quad (2.2.9)$$

Viscosidad

En términos generales se puede decir que la viscosidad es una medida de la resistencia de un fluido al corte cuando se encuentra en movimiento. De hecho, muchas veces se aprovecha esta propiedad para definir a los fluidos diciendo que se trata de cuerpos que no pueden resistir un corte a no ser que se muevan mientras que persista la acción; es decir, los fluidos se deforman continuamente como resultado de la aplicación de una fuerza cortante.

Newton encontró experimentalmente que para ciertos fluidos comunes, el esfuerzo cortante es proporcional a la rapidez de deformación angular, siendo el factor de proporcionalidad lo que actualmente se denomina coeficiente de viscosidad.

La ley de la viscosidad de Newton está expresada como:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.2.10)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante que actúa entre cualquiera de las placas y el fluido en inmediato contacto con ellas o bien, entre dos capas de cualquier fluido adyacente entre sí, $\frac{dv}{dy}$ es proporcional a la rapidez de deformación angular del fluido y μ representa la viscosidad.

Los fluidos que se comportan de esta manera como son el agua y el aire, son llamados fluidos newtonianos, el coeficiente de viscosidad depende de manera importante de la temperatura del fluido aumentando conforme ésta crece en el caso de los gases y disminuyendo en el caso de los líquidos. Si bien la viscosidad de un fluido se manifiesta cuando éste se encuentra en movimiento, la realidad es que sus efectos resultan importantes solo cuando el coeficiente de viscosidad

es relativamente grande o cuando se cuenta con gradientes transversales de velocidad fuertes. Lo anterior origina que Prandtl formulara su teoría de la capa límite, la cual anuncia, que para fluidos cuya viscosidad es moderada, los efectos viscosos resultan de importancia solamente en una zona muy delgada en inmediato contacto con el cuerpo sólido la cual es denominada capa límite, donde el gradiente transversal de la velocidad adquiere sus valores más altos. De esta manera no es necesario considerar los efectos viscosos en el resto del fluido.

Flujo laminar y flujo turbulento

Generalmente el término flujo laminar se usa para dar a entender el movimiento de un fluido en láminas o capas más o menos paralelas, a diferencia de un flujo turbulento, en el cual las partículas de un fluido se mueven de manera desordenada e irregular, mezclándose unas con otras e intercambiando cantidades relativamente grandes de momento y energía.

En general, las partículas de fluido en un flujo laminar se mueven en trayectorias bien definidas. La trayectoria que describe una partícula de fluido cuando se mueve a través del espacio es llamada línea de trayectoria mientras que una línea que se dibuja a través del fluido, tangente a los vectores de velocidad en dicho instante, es llamada línea de flujo. En un flujo estacionario laminar, las líneas de trayectoria y las líneas de flujo son idénticas no así en el caso de fluido turbulento ya que las partículas en éste, no viajan en forma ordenada. En lugar de estos, existen componentes de la velocidad transversales a la dirección principal del flujo, y estos componentes están cambiando constantemente de magnitud.

Es posible predecir si un flujo es laminar o turbulento, si conocemos su: densidad ρ ; velocidad media del flujo v_m ; viscosidad μ ; y una dimensión característica L_c , para la geometría del flujo. La dimensión característica para un flujo sobre una placa es la distancia "x" del lado principal de la placa. Para el flujo dentro de tubos, la longitud característica es el diámetro hidráulico, D_H que está dado por:

$$D_H = \frac{4(\text{área de la sección transversal})}{\text{perímetro mojado}}$$

De la ecuación anterior tenemos que para un tubo circular, el diámetro hidráulico es el mismo que el diámetro interno del tubo.

Las cuatro cantidades ρ , v_m , μ y L_c se combinan en un número sin dimensiones, el que es llamado número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v_m L_c}{\mu}$$

El número de Reynolds puede ser interpretado como la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. El valor del número de Reynolds determina la naturaleza de un fluido, en flujos laminares, las fuerzas viscosas denominan a las fuerzas de inercia. El flujo dentro de tubos circulares es siempre laminar para un número de Reynolds menor a 2300. Es común que resulte un flujo turbulento si el número de Reynolds es mayor a 4000. Cuando el número de Reynolds varía entre 2300 y 4000, el flujo se conoce como flujo de transición. El valor del número de Reynolds en que comienza la transición del flujo de laminar a turbulento es conocido como el número crítico de Reynolds.

Flujo compresible y flujo incompresible

Es una costumbre clasificar a los fluidos en gases y líquidos. Se sabe que los gases son fácilmente compresibles, estando su densidad determinada por la presión y la temperatura a la que se encuentren sujetos. Por el contrario, los líquidos, apenas se pueden comprimir cuando se encuentran bajo la acción de una presión muy grande, es por esto que se acostumbra clasificarlos como incompresibles. Sin embargo, se ha observado que los gases también resultan incompresibles cuando se mueven con velocidades moderadas. Es así, que en la actualidad se utilizan los términos flujo compresible para significar el movimiento de un fluido a velocidades bajas, trátase de un líquido o un gas. El criterio práctico para tal clasificación es precisamente el conocido número de Mach, que relaciona los efectos de inercia con los efectos elásticos.

Capa límite

Se trata de aquella región cercana de una pared sólida, a la cual un fluido se mueve paralelamente, donde los perfiles de velocidades y temperaturas del fluido adquieren la forma indicada en la figura 2.2.b

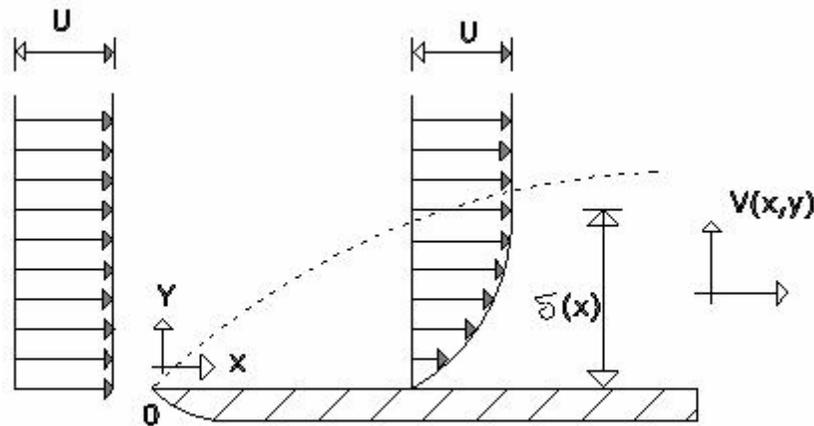


Fig. (2.2.b) Perfil de velocidades cerca de una pared

Como se observa en la figura anterior la velocidad del fluido aumenta desde el valor cero hasta el valor U , a una distancia de la pared indicada con δ . A partir de esta distancia, la velocidad del fluido ya no cambia. La delgada región que se forma a lo largo de toda pared desde su punto de inicio $x=0$ en la figura 2.2.b, con respecto al creciente δ y donde se manifiesta el efecto viscoso descrito, recibe el nombre de capa límite o capa límite mecánica.

El concepto de capa límite y las hipótesis básicas que permiten simplificar las ecuaciones de Navier–Stokes fueron desarrolladas originalmente por Prandtl a principios del siglo pasado.

Cuando la temperatura de una pared y un fluido que se mueve sobre ella son diferentes, se desarrolla una delgada región que recibe el nombre de capa límite térmica, donde se manifiestan los efectos difusivos de calor al

presentarse en dicha región, gradientes de temperatura significativos en dirección perpendicular a la pared.

Capa límite térmica

Es aquella región en donde los gradientes de temperatura están presentes en un fluido. Estos gradientes de temperatura serían el resultado de un proceso de intercambio de calor entre el fluido y la pared.

Al igual que la capa límite mecánica, la capa límite térmica de espesor δ_L , es de mayor importancias para el estudio de los fenómenos de convección; pues a través de ella se presentan la transmisión de calor entre una superficie sólida y un fluido a temperaturas ambientes.

Al estar determinada la capa límite por el movimiento del fluido, es lógico esperar que sus características dependan del régimen de flujo que se tenga. Así el perfil de temperaturas, y por lo tanto, el coeficiente de convección h que está dictado por el valor del gradiente en la pared, es diferente si se tiene un flujo laminar o si se presenta un flujo turbulento.

El grado de penetración en el flujo del efecto viscoso con respecto al efecto térmico, está regido por el número de Prandtl del fluido, $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$, pudiendo establecer que dicho parámetro es una medida del tamaño relativo de los espesores de la capa límite mecánica y térmica.

CONVECCIÓN FORZADA

Convección en el contexto de la transferencia de calor, significa el proceso de alejar la energía térmica de una superficie sólida a un fluido adyacente en movimiento, en la presencia de diferencias de temperatura o viceversa. El proceso de convección cuenta con dos procesos que contribuyen al mismo.

- a) La conducción de calor, de una superficie sólida hacia una capa de fluido adyacente

- b) El movimiento de partículas calientes de fluido, alejándose de la superficie sólida y ocupando su lugar partículas relativamente frías del mismo fluido

El movimiento de las partículas del fluido se puede atribuir a cambios de presión, a flotamiento o a una combinación de ambos. La transferencia de calor por convección se puede dividir de manera conveniente en dos áreas: convección forzada y convección natural. Pueden ocurrir situaciones donde ambas formas actúan simultáneamente y se tiene entonces una convección combinada.

Usualmente, la convección forzada es de mayor interés práctico que la convección natural debido a sus aplicaciones industriales. La mayoría de los aparatos industriales de calentamiento o enfriamiento, como son: intercambiadores de calor, condensadores, boilers, etc. incluyen en su diseño de transferencia de calor por conducción forzada un análisis detallado y complejo, debido a que se debe satisfacer la conservación de masa y de movimiento, además de cumplirse el principio de conservación de la energía.

Coefficiente convectivo de transferencia de calor

En 1701 Newton propuso la ecuación para predecir la razón de transferencia de calor por convección, Q , de una superficie sólida hacia el fluido que lo rodea.

$$Q = h_{prom} A (T_w - T_{\infty}) \quad (2.2.11)$$

Donde:

h_{prom} = coeficiente convectivo promedio de transferencia de calor

A = área de la superficie por la transferencia de calor por convección

T_w = temperatura de la superficie sólida

T_{∞} = temperatura del fluido que se encuentra suficientemente lejos de la superficie sólida, tal que no le afecte la temperatura de la superficie.

La ecuación 2.2.11 puede ser descrita para un área infinitesimal dA según:

$$dQ = hdA(T_w - T_{\infty})$$

O bien:

$$q = \left(\frac{dQ}{dA}\right) = h(T_w - T_{\infty}) \quad (2.2.12)$$

El coeficiente convectivo de transferencia de calor h , que aparece en la ecuación anterior representa un valor variable el cuál su magnitud cambiará de un problema a otro, aún cuando pueden estar involucrados el mismo sólido y el mismo fluido. A diferencia de la conductividad térmica de un material, el coeficiente convectivo de transferencia de calor no es una propiedad.

El valor del coeficiente de transferencia de calor depende de una variedad de factores, como son: la velocidad, densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico del fluido, geometría de la superficie, presencia de fuerzas de flotamiento, etc. dicha presencia tan amplia hace difícil llegar a una expresión analítica para el coeficiente de transferencia de calor.

Número de Nusselt

Si la temperatura de la superficie considerando un fluido que fluye sobre un cuerpo T_w , la temperatura del vapor T_{∞} y la temperatura del fluido cercano a la frontera sólida variaran de alguna forma como se muestra en la figura 2.2.c

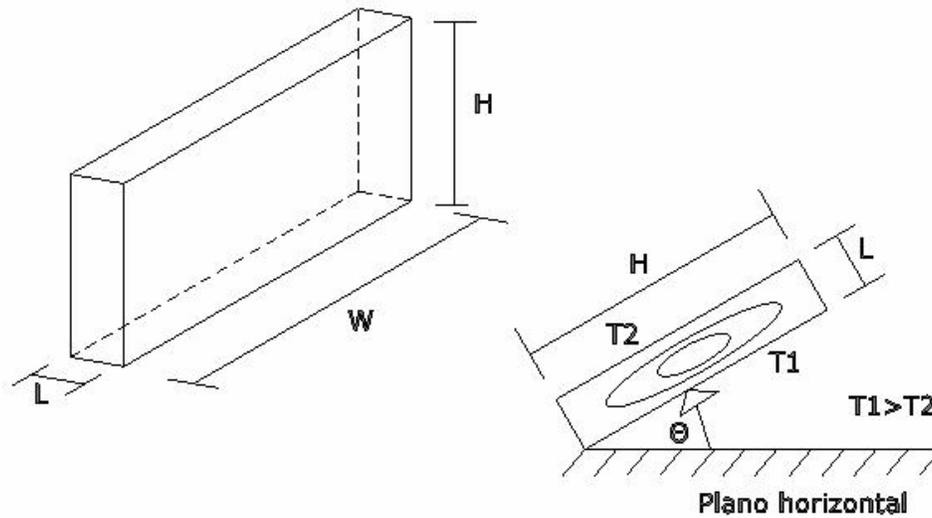


Fig (2.2.c) Convección libre en una cavidad prismática rectangular

Se puede expresar la razón de transferencia de calor Q , de la siguiente manera:

$$Q_y = -k_{y=0} A \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2.2.13)$$

En cuya expresión:

k es la conductividad térmica del fluido, evaluada en $y = 0$ donde es la interfase frontera sólida - fluido

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = \text{valor del gradiente de temperatura en el fluido en } y = 0$$

Combinando las ecuaciones 2.2.12 y 2.2.13 se obtiene:

$$hA(T_w - T_\infty) = -kA\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} \quad (2.2.14)$$

O bien:

$$\frac{h}{k} = -\frac{1}{(T_w - T_\infty)} \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0}$$

Si se definiera una distancia sin dimensiones η según $\eta = \left(\frac{y}{L_c}\right)$, en cuya expresión L_c es una longitud característica, obtenemos:

$$\frac{h}{k} = -\frac{1}{(T_w - T_\infty)L_c} \left(\frac{\partial T}{\partial \eta}\right)_{\eta=0} \quad (2.2.15)$$

O bien:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = -\frac{1}{(T_w - T_\infty)} \left(\frac{\partial T}{\partial \eta}\right)_{\eta=0} \quad (2.2.16)$$

Si se define una temperatura sin dimensiones, θ , según $\theta = \left(\frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}\right)$, entonces:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = -\left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta}\right)_{\eta=0} \quad (2.2.17)$$

La cantidad (hL_c/k) que aparece en la ecuación anterior es una cantidad de dimensiones que recibe el nombre de número de Nusselt, el cuál es el gradiente de temperatura para el fluido, evaluado en la interfase pared-fluido, k representa la conductividad térmica del fluido.

Número de Nusselt para la región de entrada en un tubo circular

Cuando un fluido con temperatura uniforme entra a un tubo que recibe un fluido de calor unitario uniforme, q_w , en su pared, se requiere de una longitud de desarrollo antes de que el perfil de temperatura quede establecido. Esta distancia es llamada longitud de entrada térmica.

En problemas de longitud de entrada térmica, el número de Nusselt no depende tan solo del número de Reynolds sino también del número de Prandtl. Este último número se define en términos de la viscosidad μ , el calor específico a presión constante C_p , y la conductividad térmica k , en la forma:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \left(\frac{\rho C_p}{k}\right) \frac{\mu}{\rho}$$

La ecuación anterior puede ser modificada de tal modo que el número de Prandtl se exprese como una razón de la viscosidad cinemática ν , y la difusividad térmica α .

$$Pr = \left(\frac{\rho C_p}{k}\right) \frac{\mu}{\rho} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \nu = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.2.18)$$

Físicamente, el número de Prandtl es una medida de que tan rápidamente se disipa el calor, comparado con la razón de difusión de calor a través del fluido. El agua líquida saturada, tiene el número de Prandtl de 13.35 a 32°F, que cae hasta 1.00 a 400°F.

La siguiente fórmula define los valores del número de Nusselt Nu, para un flujo de calor unitario sobre la pared, para la región de entrada térmica.

$$x^* = \frac{(x/rw)}{RePr}$$

En donde:

x= distancia a la entrada del tubo

rw= radio interior del tubo

Re= número de Reynolds $\left(\frac{\rho v_m D}{\mu}\right)$

Pr= número de Prandtl $\left(\frac{\mu C_p}{k}\right)$

El producto (Re Pr) es conocido con el nombre de número de Peclet (Pe)

$$Pe = \frac{\rho v_m C_p D}{k} = \frac{v_m D}{\alpha}$$

Este número de Peclet es una medida de la diferencia de la energía térmica que transfiere un fluido por convección a la energía térmica que conduce el mismo fluido.

En general el coeficiente de transferencia de calor promedio (h_{prom}) para flujo a través de un tubo cuya longitud es L, está definido por la ecuación:

$$h_{prom} = \frac{\frac{1}{A} \int q \, dA}{\frac{1}{L} \int_0^L (T_w - T_b) dx} \quad (2.2.19)$$

La cantidad ($q dA$) de la ecuación anterior es la razón de transferencia de calor a través de un área elemental dA de la pared del tubo. La integral que aparece en el numerador representa la razón sobre el total de transferencia de calor a través del área de la superficie (A) del tubo y el denominador representa la diferencia de temperatura media entre la pared del tubo y el fluido. Si el flujo de calor es uniforme y se designa como q_w , entonces la expresión para h_{prom} se simplifica a la fórmula quedando de la forma:

$$h_{prom} = \frac{q_w}{\frac{1}{L} \int_0^L (T_w - T_b) dx} = \frac{q_w}{(T_w - T_b)} \quad (2.2.20)$$

La cantidad (T_w y T_b) que aparece en la ecuación anterior es la diferencia promedio entre la temperatura de la pared y la temperatura del fluido a lo largo de una longitud (L) del tubo.

El propósito de la solución al problema de la transferencia de calor, de flujo a través de un tubo con flujo de calor unitario uniforme en la pared, consiste en relacionar estas dos temperaturas a través de la definición del coeficiente de transferencia de calor.

Fórmulas para flujo a través de tubos

Régimen laminar

Para un tubo circular donde la temperatura de la pared es constante, Hausen recomendó la siguiente expresión para calcular el valor promedio del número de Nusselt:

$$Nu_{prom} = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)Pe}{1+0.04[(D/L)Pe]^{2/3}} \quad (2.2.21)$$

Donde:

D = diámetro interior del tubo

L = longitud

Cuando se usa el valor de h_{prom} se debe usar la diferencia de temperatura media logarítmica ($LMTD$) para calcular la razón de transferencia de calor

Régimen turbulento

Para un flujo turbulento desarrollado por completo en tubos lisos Dittus y Boelter sugirieron las siguientes correlaciones:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad \text{para calentamiento} \quad (2.2.22)$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.3} \quad \text{para enfriamiento} \quad (2.2.23)$$

De las ecuaciones anteriores se observa que el coeficiente de transferencia de calor es directamente proporcional a la velocidad promedio del fluido, e inversamente proporcional al diámetro del tubo. De aquí que para un fluido de masa dado, únicamente en el diámetro del tubo se reduce el coeficiente de transferencia de calor proporcionalmente. De lo anterior se concluye que el uso de tubos de diámetro pequeño conduce a valores altos del coeficiente de transferencia de calor sin embargo, los costos de bombeo también son elevados en tales circunstancias.

CONVECCIÓN NATURAL

Se origina cuando una fuerza del cuerpo ejerce su acción en un fluido donde existe un gradiente de densidad. El efecto global es una fuerza de flotación que provoca corrientes convectivas, siendo el caso más común cuando el gradiente de densidad se debe a un gradiente de temperatura y a la fuerza del cuerpo proveniente de un campo gravitacional. Siendo las velocidades del fluido en convección natural generalmente mucho más pequeñas que las velocidades en un flujo convectivo forzado, los correspondientes coeficientes de convección también resultan menores en el primer caso. Podría pensarse que los procesos de convección naturales son poco relevantes, lo anterior no es así; basta pensar que en numerosos sistemas donde se presentan los tres modos de transmitir calor la resistencia térmica ocasionada por convección natural es la más grande y juega un papel muy importante en el comportamiento de todo el sistema.

Las partículas de fluido que se localizan cerca de la placa caliente se calientan más que el fluido ambiente, dando por resultado cambios de densidad en diferentes presiones. El cambio de densidad activa la fuerza del cuerpo debida a la gravedad, que da lugar, a su vez, a un movimiento de las partículas del fluido que se encuentran en la región cercana a la superficie caliente. La convección natural es el tipo de transferencia de calor que se manifiesta en los calentadores de piso o radiadores de vapor en las casas.

El coeficiente convectivo natural es determinado por la ecuación:

$$h = \frac{Q_{conv}}{Ap(T_w - T_\infty)} \quad o \quad h = \frac{P - Q_{rad}}{Ap(T_w - T_\infty)}$$

Donde:

Ap = área de la superficie total de la placa

Q_{rad} = energía calorífica debida a la radiación

T_w = temperatura de la superficie

T_{∞} = temperatura del fluido

Q_{conv} = energía calorífica transmitida por convección

h = coeficiente de convección natural

P = energía del elemento calentado

Flujo en espacios cerrados

En muchas aplicaciones de ingeniería es necesario considerar la transferencia de calor entre superficies a diferentes temperaturas, las cuales encierran un fluido. Se trata entonces de espacios cerrados donde se presentan fenómenos de convección natural. El análisis se presenta complicado por el hecho de que generalmente la temperatura del fluido depende tanto de la coordenada transversal como de la longitudinal. El aprovechamiento de la energía solar constituye un ejemplo típico.

Fórmulas para la transferencia de calor por convección natural en una placa vertical

Régimen laminar

Squire y otros investigadores, obtuvieron una solución aproximada de las ecuaciones que describen la convección natural en una placa natural isotérmica, suponiendo perfiles aproximados de velocidad y de temperatura en las ecuaciones integrales de movimiento y de energía, el resultado de la investigación es:

$$Nu_x = 0.508 \frac{Pr^{1/4}}{(0.952 + Pr)^{1/4}} Ra_x^{1/4} \quad (2.2.24)$$

La expresión anterior concuerda con resultados experimentales que se han obtenido. Observándose que para valores grandes del número de Prandtl, el número de Nusselt es una función del número de Rayleigh solamente.

También la ecuación 2.2.24 puede expresarse para calcular el coeficiente de transferencia de calor en la superficie que da hacia abajo en un a placa inclinada o un ángulo arbitrario con la vertical, siempre y cuando se remplace la aceleración gravitacional (g) por su componente en la dirección paralela a la superficie de la placa.

Régimen turbulento

Rohsenow y Hartnett, presentaron la siguiente correlación para determinar el número de Nusselt en una placa laminar isotérmica:

$$Nu_x = 0.0295 Pr^{7/15} Gr^{2/5} (1 + 0.494 Pr^{2/3})^{-2/5} \quad (2.2.25)$$

Esta expresión es inválida para fluidos cuyos números de Prandtl son muy grandes o muy pequeños, es por esto, que su principal aplicación está en gases. La expresión 2.2.25 para aire ($Pr = 0.72$) nos da:

$$Nu_x = 0.025 (Gr_x Pr)^{2/5} \quad (2.2.26)$$

Fórmulas para convección natural en otras geometrías

Rohsenow y Hartnett, presentaron la siguiente correlación para calcular el número de Nusselt promedio en diferentes geometrías y en el intervalo $10^4 < Ra_L < 10^9$:

$$Nu_L = C_1 Ra_L^{1/4} \quad (2.2.27)$$

Donde C_1 es una función de la geometría y del número de Prandtl. Para el caso de gases esta función es independiente del número de Prandtl.

Algunos valores de C_1 para el caso de gases que muestra en la tabla 2.2.1b

GEOMETRÍA	C_1	C_2
Cilindro horizontal, L= diámetro	0.47	0.10
Esfera, L = diámetro	0.49	
Placa horizontal. Superficie superior si la placa es calentada (superficie inferior si se enfría) L= ancho	0.54	0.14
Placa horizontal. Superficie inferior si la placa es calentada (superficie inferior si se enfría) L= ancho	0.27	

TABLA 2.2.1b

Los mismos autores presentan la siguiente correlación aplicable para valores de $Ra_L > 10^9$

$$Nu_L = C_2 Ra_L^{1/3} \quad (2.2.28)$$

Para el caso de gases C_2 también es independiente del número de Prandtl y algunos valores también se muestran en la tabla 2.2.1b.

2.3 RADIACION

Radiación térmica

Es un hecho que la materia siempre absorbe energía radiante y a temperatura diferente del cero absoluto, también la emite, es decir, a diferencia del calor, que sólo se transfiere de la menor a la mayor temperatura, la radiación se intercambia, siendo el calor transferido la diferencia entre la energía absorbida y la emitida. La energía radiante abarca una gama de frecuencias que se

extiende teóricamente de 0 a ∞ . La potencia y la distribución según las frecuencias de esta energía, varían con la temperatura que emite. La radiación térmica es denominada, como la radiación debida exclusivamente a la temperatura de la materia, es decir, la emisión provocada por bombardeo electrónico (rayos x), etc. se le asocia a la rotación y vibración moleculares aunque también puede incluir cambios de los niveles de energía de los electrones.

La radiación térmica es definida como la energía radiante emitida por un medio como consecuencia de su temperatura y la escala de longitudes de onda usualmente está comprendida entre 0.1 y 100 μm .

La energía por radiación no necesita para transferirse un medio para propagarse y en el vacío se efectúa en línea recta. El intercambio de energía radiante se puede producir entre dos superficies o entre una superficie y un medio participante. Las características básicas de la radiación térmica, además de la propagación rectilínea, son la reflexión y la absorción, las cuales dependen del origen de la radiación, la naturaleza de la superficie y el contenido energético variable según la frecuencia. Dichas características fueron descubiertas por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele.

Para explicar el comportamiento de la radiación térmica existen dos teorías la ondulatoria y la corpuscular. La teoría ondulatoria establece que la radiación puede imaginarse como una onda que oscila con una frecuencia ν , y una longitud de onda λ El producto de la frecuencia por la longitud de onda es la velocidad de propagación o velocidad de la luz c .

$$c = \lambda \nu \quad (2.3.1)$$

La teoría corpuscular admite que la energía radiante se transforma en forma de paquetes llamados fotones. Cada fotón se propaga con la velocidad de la luz a un nivel energético distinto dado por:

$$e = h\nu \quad (2.3.2)$$

Donde h es la constante de Planck. Cuando un cuerpo se calienta los electrones libres pueden saltar a niveles de mayor energía. Cuando un electrón vuelve a su nivel energético inferior emite un fotón cuya energía es igual a la diferencia energética entre su estado excitado y el estado de equilibrio. En toda superficie y en cualquier instante existen numerosos electrones que experimentan un cambio en su nivel energético y, por tanto, la energía que abandona la superficie se distribuye dentro de un espectro de frecuencia. La energía se emite solamente en función de la temperatura del cuerpo. La energía que abandona la superficie de este modo es llamada radiación térmica.

Física de la radiación

Cuerpo negro

Para el estudio fenomenológico de este proceso se parte del modelo ideal, denominado cuerpo negro, que solo absorbe y emite energía, es decir, no refleja y cuya superficie se comporta igual sea cuales sea, la frecuencia y la dirección de la radiación incidente o emergente. Desde el punto de vista práctico el sol es el cuerpo negro más importante. Para este modelo se han establecido leyes cuantitativas como las de Planck y Wien, que mediante la aplicación de la ley de la conservación de la energía y las leyes auxiliares como la de Kirchhoff, y descomposiciones permiten estudiar los cuerpos reales que además de absorber y emitir, reflejan y pueden ser parcialmente transparentes, actuando su superficie de forma diferente según la frecuencia y dirección de la radiación.

Ley de Planck

Siempre que un cuerpo negro se calienta a una temperatura (T) emitirá fotones de su superficie. Los fotones poseen una distribución definida de energía que depende de la temperatura superficial (T). Planck demostró que la energía emitida por un cuerpo negro a una longitud de onda (λ) y temperatura (T) es:

$$\epsilon_{b\lambda}(T) = \frac{\epsilon_1}{\lambda^5 (e^{\epsilon_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.3.3)$$

En donde:

$\epsilon_{b\lambda}$ = potencia emisiva espectral o monocromática de un cuerpo negro a la temperatura (T)

C_1 = primera constante de radiación ($3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$)

C_2 = segunda constante de radiación ($1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$)

La ecuación anterior es la que denomina la llamada ley de Planck

Ley del desplazamiento de Wien

La longitud de onda a la cual la potencia emisiva del cuerpo negro alcanza un valor máximo para una temperatura dada se puede deducir de la ley de Planck imponiendo la condición de máximo:

$$\frac{d\epsilon_{d\lambda}}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{C_1}{d\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \right]_{T=\text{cons}} = 0$$

El resultado es:

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \quad (2.3.4)$$

En donde λ_{\max} es la longitud de onda correspondiente al máximo de potencia emisiva monocromática de una superficie negra a la temperatura (T).

El lugar geométrico de los puntos descritos por la ley de Wien se incluyen en la figura 2.3.a

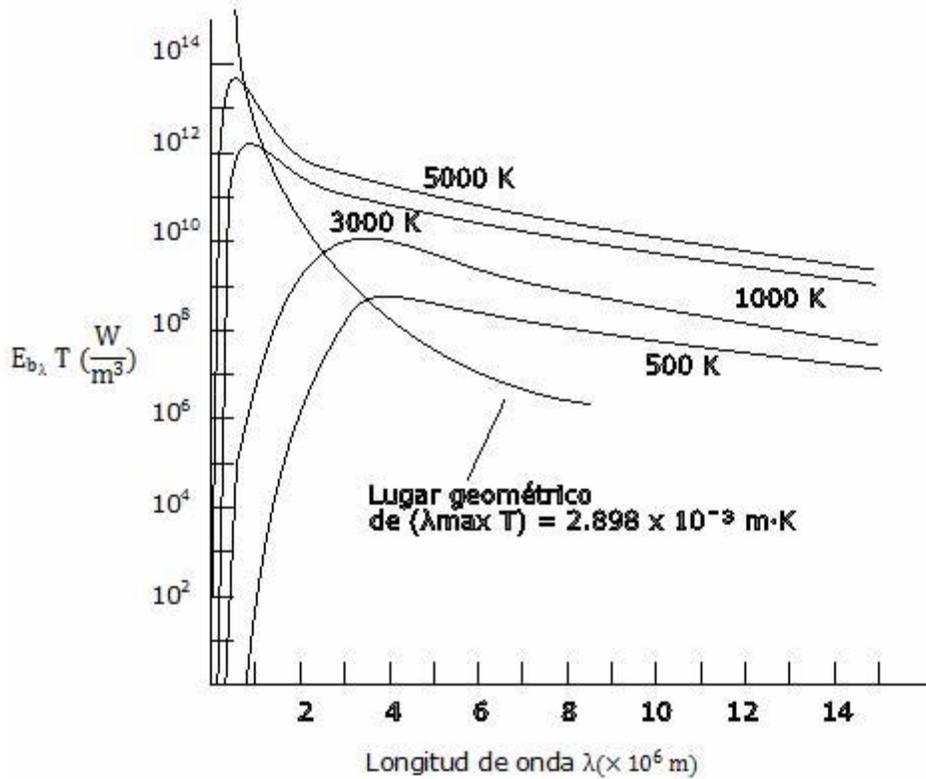


Fig. (2.3.a) Poder emisor monocromático del cuerpo negro

El valor máximo de la potencia emisiva monocromática del cuerpo negro puede obtenerse sustituyendo la ecuación 2.3.4 en la ecuación 2.3.3 resultando:

$$(\varepsilon_{b,\lambda}) = 1.287 \times 10^{-5} T^5 \quad (2.3.5)$$

Ley de Stefan-Boltzmann

El poder emisor total es la cantidad total de energía radiada por unidad de área que emite una superficie a la temperatura absoluta (T) y a todas las longitudes de onda. Si la superficie corresponde a un cuerpo negro, el poder

emisivo total viene dado por la integral de la distribución de Planck para todas las longitudes de onda:

$$\varepsilon_b(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon_{b\lambda}(T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} d\lambda \quad (2.3.6)$$

La integral nos da como resultado:

$$\varepsilon_b(T) = \sigma T^4 \quad (2.3.7)$$

La ecuación anterior es la denominada ley de Stefan-Boltzmann. El símbolo σ es la constante de Stefan-Boltzmann la cual tiene el valor:

$$\sigma = \left(\frac{\pi}{c_2}\right)^4 \frac{c_1}{15} = 5.67 \times 10^{-8} \quad (2.3.8)$$

La constante C_1 y C_2 son las utilizadas en la ley de Planck y ε_b se mide en unidades de flujo térmico W/m^2 .

La ley de Stefan-Boltzmann debido al pequeño valor de σ , nos dice que los efectos de la radiación en la mayor parte de las circunstancias se consideran insignificantes a bajas temperaturas. A la temperatura ambiente la potencia emisiva total de un cuerpo es aproximadamente solo de $460 W/m^2$. Por ello a temperaturas bajas es justificable en muchos casos el despreciar los efectos radiactivos. Sin embargo, su importancia es grande a altas temperaturas, ya que la potencia emisiva crece con la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

Propiedades de la radiación

Existen tres tipos de propiedades: propiedades totales, propiedades monocromáticas o espectrales y propiedades direccionales.

a) *Propiedades totales de la radiación*

Cuando la irradiación choca contra una superficie, parte de la energía es absorbida dentro del material, parte se refleja en la superficie y el resto es transmitida dentro del cuerpo. Así tres propiedades radiativas: *absortividad*, *reflectividad* y *transmisividad*, describen como la energía incidente se distribuye en estas tres categorías.

La absortividad (α) de la superficie es la fracción de energía incidente absorbida por el cuerpo. La reflectividad (ρ), de la superficie se define como la fracción de energía incidente reflejada. La transmisividad (τ) del cuerpo es la fracción de energía incidente transmitida a través del cuerpo.

Otra propiedad de la radiación total muy importante es la emisividad para un cuerpo negro. La emisividad de una superficie se define como el cociente entre la energía total emitida y la energía total emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La ecuación que define la emisividad total (ϵ) es:

$$\epsilon = \frac{\epsilon(T)}{\epsilon_b(T)} = \frac{\epsilon(T)}{\sigma T^4} \quad (2.3.9)$$

Si se hace un balance energético sobre un cuerpo negro, y sabiendo que la irradiación debe ser absorbida, reflejada y transmitida a través del cuerpo la expresión del balance energético nos da:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.3.10)$$

b) *Propiedades de la radiación monocromáticas*

Este tipo de propiedades se aplican a una sola longitud de onda, la absorptividad monocromática α_λ , por tanto, la irradiación absorbida a la longitud de onda λ dividida por la irradiación incidente sobre la superficie de dicha longitud de onda. La ecuación que expone la relación existente entre la absorptividad monocromática de un cuerpo y su absorptividad total (α) es:

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda d\lambda} \quad (2.3.11)$$

Donde el subíndice λ se refiere a un valor monocromático.

En un balance energético sobre una superficie considerando la radiación monocromática en la ecuación 2.3.10 se convierte en:

$$\alpha_\lambda \rho_\lambda \tau_\lambda = 1 \quad (2.3.12)$$

La emisividad monocromática es:

$$\epsilon_\lambda = \frac{\epsilon_\lambda(T)}{\epsilon_{b\lambda}(T)} \quad (2.3.13)$$

Y la relación entre la emisividad monocromática (ϵ_λ) y la emisividad total (ϵ) es:

$$\epsilon = \frac{\int_0^\infty \epsilon_\lambda \epsilon_{b\lambda}(T) d\lambda}{\int_0^\infty \epsilon_{b\lambda}(T) d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^\infty \epsilon_\lambda \epsilon_{b\lambda}(T) d\lambda \quad (2.3.14)$$

Un cuerpo útil que simplifica grandemente los cálculos de la radiación es el cuerpo gris. Un cuerpo gris es una superficie cuyas propiedades monocromáticas son constantes para todas las longitudes de onda. Cuando una superficie es gris se dice que:

$$\varepsilon_{\lambda} = \text{constante}$$

$$\alpha_{\lambda} = \text{constante}$$

c) Propiedades direccionales de la radiación

Estas propiedades definen la variación angular. Las propiedades radiativas son las funciones de la longitud de onda y de las condiciones que describen las áreas emisoras y receptoras.

La situación se complica ya que estas propiedades dependen también de la dirección según la cual, la energía incide o abandona la superficie.

Para poder relacionar las propiedades direccionales con las totales, es necesario conocer dos magnitudes.

La primera es el ángulo sólido (dw) que denota la siguiente ecuación:

$$dw = \frac{dA_N}{r^2} = \frac{dA \cos \theta}{r^2} \quad (2.3.15)$$

La segunda magnitud que debe conocerse es la intensidad de radiación (I) que, está definida como la energía radiante por unidad de tiempo, por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada en una dirección normal a la superficie, es decir:

$$I(\theta, \phi) = \frac{dq''}{\cos\theta dw} \quad (2.3.16)$$

Donde q'' es utilizada para expresar la energía por unidad de tiempo y de área.

Una vez conocida la distribución de intensidad se procede a integrar la ecuación 2.3.16 para determinar la potencia emisiva de la superficie y queda:

$$\epsilon = q'' = \int I(\theta, \phi) \cos\theta dw \quad (2.3.17)$$

Las propiedades radiactivas direccionales no pueden ser definidas en función de la potencia emisiva ya que ésta no depende de la dirección respecto a la superficie.

Estas propiedades deben ser definidas en función de la intensidad, es decir:

$$\epsilon(\theta, \phi) = \frac{I(\theta, \phi)}{I_b} \quad (2.3.18)$$

Sustituyendo la intensidad por el valor dado en la ecuación 2.3.18 entre emisividad total y dirección es:

$$\epsilon = \frac{1}{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \epsilon(\theta, \phi) \sin\theta \cos\theta d\theta d\phi \quad (2.3.19)$$

Cuando la emisividad total (ϵ) depende solo de θ , la integral de la ecuación 2.3.19 sobre la variable ϕ resulta:

$$\epsilon = 2 \int_{\theta=0}^{\pi/2} \epsilon(\theta) \operatorname{sen}\theta \cos\theta d\theta \quad (2.3.20)$$

CAPITULO 3

RADIACIÓN SOLAR

En las últimas décadas, la Energía Solar ha cobrado importancia como fuente energética, puesto que las reservas de combustibles fósiles no son eternas. Es por esto que se han realizado numerosos estudios referentes a la Radiación Solar.

El Sol cuenta con un diámetro de 1,391,000 Km, con una masa de 2×10^{30} Kg. y se encuentra a 149,450,000 Km de distancia de la Tierra. El núcleo del Sol tiene una temperatura de 10 millones de grados centígrados y ésta va disminuyendo hasta llegar a la superficie solar donde la temperatura promedio es de 5,762 °C

En el interior del Sol, como en todas las estrellas se llevan a cabo reacciones de fusión nuclear, en este tipo de reacciones se unen núcleos de átomos ligeros como el hidrógeno y el helio para formar átomos más pesados y en este proceso liberar grandes cantidades de energía; la energía que nos envía el Sol es por lo tanto de origen nuclear. Dos núcleos de deuterio (isótopo del hidrógeno) se fusionan transformándose en helio; los núcleos de helio, en carbono, y así sucesivamente hasta constituir elementos cada vez más pesados.

Actualmente, el Sol está compuesto de 73.46% de hidrógeno y 24.85% de helio el porcentaje restante se trata de elementos más pesados.

Durante las reacciones nucleares, parte de la masa de las partículas que intervienen se convierte en energía, la cual puede ser calculada empleando la fórmula de Einstein $E=mc^2$ (donde E equivale a la energía, m a la masa y c a la velocidad de la luz, que es igual a 300,000 Km/s). de esta forma, el Sol irradia la energía proveniente de la fusión de los núcleos atómicos que lo componen y como lo hace en todas direcciones, una parte llega a la Tierra. El Sol existe desde hace 4,600 millones de años y se cree que seguirá viviendo durante un periodo similar; por lo tanto, para cualquier fin práctico, el Sol es una fuente inagotable de energía.

La radiación que emite el Sol en todas direcciones, producto de las reacciones nucleares, corresponde a una parte del llamado Espectro Electromagnético.

Cada cuerpo, según sus características intrínsecas, emite un patrón de radiación electromagnética que puede identificarse en el espectro electromagnético. En la figura 3.1.a se pueden apreciar las diferentes formas de radiación electromagnética, que dependen de la cantidad de energía que ésta posea. Para nosotros la más común es la luz visible, pero también los rayos X o los rayos infrarrojos que constituyen otras formas de radiación electromagnética.

	ν	λ	E	
	10^{22}	10^{-13}	10^8	RAYOS GAMMA
	10^{21}		10^7	
			$10^6 = 1 \text{ MeV}$	
	10^{18}	10^{-10} \AA	10^5	RAYO X
		10^{-9} nm	10^4	
			$10^3 = 1 \text{ kev}$	ULTRAVIOLETA
	10^{15}		10^2	
			1 ev	VISIBLE
			10^{-1}	INFRARROJO
1 THZ (terahertz)	10^{12}		10^{-2}	
		$10^{-3} = 1 \text{ mm}$	10^{-3}	
		$10^{-2} = 1 \text{ cm}$	10^{-4}	MICROONDAS
			10^{-5}	
1 GHZ (gigahertz)	10^9		10^{-6}	
		$10^0 = 1 \text{ m}$	10^{-7}	Radar
			10^{-8}	VHF (frecuencia ultra alta)
1 MHZ (megahertz)	10^6	$10^{-3} = 1 \text{ km}$	10^{-9}	VHF(Tv) FM (frecuencia muy alta)
			10^{-10}	Transmisión de radio
			10^{-11}	RADIOFRECUENCIA
1 KHZ (kilohertz)	10^3	$10^0 = 1 \text{ mm}$	10^{-12}	
			10^{-13}	
			10^{-14}	
1 HZ	10^0		10^{-15}	

Frecuencia (Hertz) Longitud de onda (metros) Energía (electrón-volts) Radiación

Figura 3.1.a. Espectro electromagnético.

En 1905 Albert Einstein propuso una teoría corpuscular en la que señalaba que la luz estaba compuesta de paquetes de energía radiante llamados fotones, posteriormente, varios experimentos demostraron que las partículas atómicas, incluidos los fotones, podían presentar patrones de interferencia y difracción, características que corresponden a una onda y no a una partícula. Sin embargo, los científicos se preguntaban si la luz estaba compuesta de ondas o de partículas, lo cual representaba una incógnita, siendo hasta finales de la década de los años veinte que la respuesta la dio la mecánica cuántica teoría que señala que la luz tiene manifestaciones de partícula y de onda, es decir, tiene una naturaleza dual; por lo cual no pueden ser excluidos ambos conceptos.

La luz se comporta como onda o como partícula, según el instrumento que se use para analizarla.

Una característica común que comparten todos los fotones es que viajan a una velocidad constante en el vacío es decir, a la velocidad de la luz, que es la más alta que existe en el Universo. Una propiedad curiosa de estas partículas es que un fotón en reposo tiene una masa igual a cero.

A pesar de que la velocidad de la luz es muy grande, un rayo del Sol tarda aproximadamente ocho minutos en llegar a la Tierra. En la vida cotidiana, sin embargo, la luz de un foco parece que nos llega instantáneamente. (Por ejemplo, la luz de un foco colocado a 1 m de distancia, tarda 0.33×10^{-8} s.)

Los rayos que provienen del Sol traen consigo fotones de características diferentes (rayos gamma, rayos ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos y ondas de radio), siendo todos estos los constituyentes del espectro Solar.

La figura 3.1.b ilustra cómo gran parte de la radiación solar (el 90% aproximadamente) está constituida por rayos infrarrojos y luz visible.

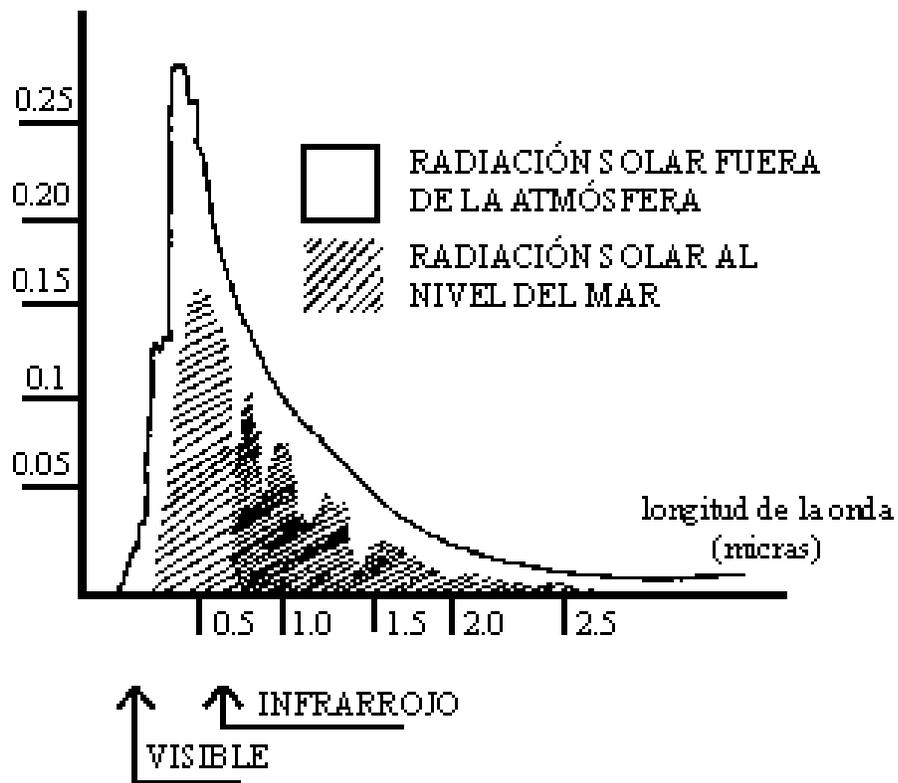


Figura 3.1.b

Características del Sol

El núcleo solar es la región que comprende el 23% de su radio, a partir del centro. Este corresponde a solo el 15% del volumen total pero contiene el 40% de la masa y genera el 90% de la energía. En esta región la temperatura es del orden de 10^7 °C y su densidad de 10^5 Kg/m³. A una distancia del 70% del radio solar, la temperatura disminuye a 10^5 °C y la densidad de 70 Kg/m³. La zona comprendida desde el 70% al 100% del radio solar, es conocida como zona convectiva y su temperatura cae hasta valores entre 5,000 y 6,000 °C, mientras que su densidad desciende a 10^{-5} Kg/m³. La capa externa que comprende esta región recibe el nombre de fotosfera y es considerada como la superficie del sol, por ser esta una región opaca, desde la cual se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio.

El sol a diferencia de la Tierra, no cuenta con una superficie física claramente definida ya que el sol desde su núcleo hasta la superficie se encuentra en forma

gaseosa. Sobre la fotosfera, en la cual también existen gases, los cuales se presentan esencialmente transparentes, constituyen la corona del sol observable sobre los eclipses totales de sol. La corona solar es la atmósfera del sol de forma similar a como sucede en la atmósfera terrestre. La corona es cada vez más tenue a medida que se está a mayor distancia del núcleo solar, llega confundirse con el vacío relativo que existe en el espacio interestelar.

Posición del Sol

Un factor que determina la incidencia de la radiación sobre un captador solar, es el movimiento aparente del sol a través de la bóveda celeste, a lo largo del día y del año. La Tierra describe un movimiento de traslación alrededor del sol que sigue una trayectoria elíptica, con una excentricidad del 3%. La línea imaginaria que representa la órbita descrita es llamada eclíptica. En su movimiento de traslación el eje de rotación terrestre forma siempre el mismo ángulo de 23.45° con la perpendicular al plano de la eclíptica. El ángulo que forma el plano de la eclíptica con el plano del ecuador varía a lo largo del año, es decir, éste ángulo, conocido como declinación varía entre -23.45° el día del solsticio de invierno y 23.45° el día del solsticio de verano.

Radiación directa y radiación dispersa

Radiación directa:

La radiación directa, es la referida al flujo solar que llega a la superficie terrestre sin haber sufrido ninguna dispersión al atravesar la atmósfera terrestre. Esta radiación procede del disco geométrico del sol y es la componente de la luz solar que es enfocada mediante un sistema óptico dando una imagen de disco al sol.

Radiación dispersa:

La atmósfera se encarga de producir una componente difusa de luz dispersa a través de la denominada dispersión de Rayleigh. Es decir, absorción y dispersión molecular del aire seco; absorción y dispersión por el polvo y aerosoles; absorción selectiva por el vapor de agua, monóxido y dióxido de

carbono; reflexión y absorción en las capas de las nubes y finalmente la superficie del terreno que dispersa la luz solar.

La radiación dispersa no puede ser enfocada por ningún sistema óptico, pero contribuye al flujo que reciben los colectores de placa plana y a otros sistemas que carecen de procedimientos de enfoque.

La cantidad exacta de radiación recibida en la Tierra depende de la altura sobre el nivel del mar y la posición del sol relativa al punto de observación, lo cual determina la distancia a través de la atmósfera que la radiación debe penetrar antes de alcanzar la Tierra. En latitudes medias, cuando el cielo está claro, la radiación recibida sobre una superficie situada perpendicularmente al Sol dentro de ± 4 horas del medio día, es en promedio el 70% de la constante solar (1 KW/m^2 aprox.).

Radiaciones electromagnéticas

Las radiaciones electromagnéticas son semejantes entre sí, diferenciándose solo de la longitud de onda. La longitud de onda más pequeña que se conoce es la radiación Gamma que es del orden de una cienmillonésima de milímetro.

La energía de un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda de la radiación que representa, de este modo, los fotones de radiación Gamma poseen gran cantidad de energía por su pequeña longitud de onda, a medida que se alejan del centro del Sol chocan con núcleos o con electrones o en su caso son desviados cuando la colisión no se llega a reproducir. En cada uno de estos fenómenos parte de la energía pasa a las partículas con las que choca y los electrones resultantes al tener menor energía que antes, tendrán una longitud de onda mayor. Pronto la radiación Gamma se debilita convirtiéndose en rayos-X con longitudes de onda del orden de una millonésima de milímetro.

Cerca de la superficie del Sol donde la temperatura ha disminuido lo suficiente para que puedan existir átomos enteros, existe otro mecanismo por el que se debilita la radiación en el cuál, el fotón, al chocar hace que un electrón se traslade desde una órbita interior a una exterior, el electrón, al volver de este estado de excitación, a su lugar de origen, pierde energía también de radiación, por último las colisiones dan a los átomos energía cinética adicional que se define en el movimiento turbulento del gas en la superficie.

La radiación que sale del Sol, al espacio, se distribuye en una amplia serie de longitudes de onda, donde la mayor parte de la energía corresponde a las longitudes de onda entre diezmilésimas de milímetro y una centésima de milímetro.

Captación de la energía solar según la teoría cuántica

La teoría cuántica, la cual está relacionada con la dualidad de comportamiento onda-partícula es la encargada del estudio de los objetos más pequeños como se comentó anteriormente. En muchos casos, la luz muestra este carácter ondulatorio pudiéndose medir fácilmente su longitud de onda λ . Newton, consideró en principio a la luz como una corriente de partículas, posteriormente esta concepción fue reutilizada en el concepto de fotón ideado por Einstein para explicar el hecho de que la luz pudiese hacer salir a los electrones de los átomos. En este fenómeno fotoeléctrico, la luz expone propiedades características de las partículas cuya energía depende de la longitud de onda de la luz al considerarla como fenómeno ondulatorio. Todas las demás radiaciones electromagnéticas poseen propiedades análogas, es decir, la relación de semejanza entre las diferentes radiaciones.

La suposición de la energía de cualquier sistema que muestre propiedades ondulatorias solo puede variar en múltiplos de una cantidad definida, este es el argumento esencial de la teoría cuántica. Esta variación mínima es llamada *cuanto* y está relacionada con la frecuencia de la onda asociada.

Cuando una radiación de longitud de onda, λ , se desplaza con una velocidad, v , la frecuencia, que es el número de ondas que pasan por un determinado punto durante la unidad de tiempo es:

$$v = \frac{v}{\lambda} \quad 3.1$$

La magnitud del *cuanto* de energía para una onda está dado por:

$$E = hv \quad 3.2$$

Donde h , es la constante de Planck, siendo su valor sumamente pequeño, 6.6×10^{-34} J/s, de modo que solamente para frecuencias muy altas la energía cuántica es lo suficientemente grande para poder ser apreciables las variaciones discontinuas.

Utilizando la ecuación 3.2, podemos obtener el *cuanto* para el caso de la luz, que sería la energía del Fotón, el cual es de alrededor de 3×10^{-19} J. Mediante aparatos sensibles puede ser detectada cierta presión cuando la luz incide en un objeto, lo cual puede ser relacionado con el momento de los fotones de luz. Partiendo de la forma en que la presión de la luz varía según la longitud de onda, λ , se ha hallado en el momento, q , de un fotón de radiación está relacionado con la longitud de onda asociada mediante la expresión:

$$q = \frac{h}{\lambda} \quad 3.3$$

Esta ecuación ha sido ampliamente confirmada mediante numerosos experimentos desde que Broglie, empezó, a revisar la teoría cuántica, y propuso que la longitud de onda, de la onda asociada a cualquier partícula está también relacionada con el momento, q , al igual que sucede en la radiación.

Emisión de la radiación

Cuando un cuerpo absorbe radiación se incrementa su estado de excitación sobretodo los electrones que se sitúan en niveles energéticos altos produciéndose con esto fuertes vibraciones de las mallas cristalográficas.

Cuando los fotones incidentes se retiran del cuerpo, éste tiende a restablecer su estado primitivo o inicial mediante la reirradiación de esta energía adicional.

El proceso es desarrollado ahora en sentido inverso; los fotones emitidos nuevamente, tienen longitudes de onda determinadas, que dependen de la variación de energía, aunque el número de posibles valores es tan grande que se puede considerar continuo al espectro de emisión.

Como resultado de la redistribución de energía, la radiación emitida puede que tenga una distribución de longitudes de onda diferentes de la reabsorción. En particular la distribución depende ahora fundamentalmente de la temperatura del conjunto del cuerpo.

La acción recíproca entre radiación y cualquier cuerpo, suele ser muy compleja, es por tanto totalmente imposible predecirla partiendo de los principios básicos, es por esto que se toma un cuerpo como patrón o modelo con propiedades determinadas, si éste cuerpo tiene un número infinito de niveles de energía permitidos es llamado cuerpo negro, ya que puede absorber toda la radiación que incide sobre cualquiera que sea su longitud de onda.

La predicción de las propiedades de radiación de un cuerpo negro se debe a Planck, quien propuso el primer caso de utilización de las ideas de la teoría cuántica para un cuerpo negro, siendo uno de los pasos conceptuales más importantes en la historia de la física.

La radiación emitida por un cuerpo negro, tiene una distribución concreta, de densidad energética “ D ”, con respecto a la longitud de onda, debido a su temperatura, esto se puede expresar de la forma:

$$D = T^5(\lambda T) \quad 3.4$$

Donde λ es la longitud de onda en cuestión, y T es la temperatura absoluta del cuerpo. Vale hacer notar que la densidad de energía depende en gran medida del producto (λT) .

Constante solar

La constante solar I_{cs} es el nombre dado a la cantidad de energía radiante procedente del sol que llega a la Tierra por unidad de tiempo (un segundo) y unidad de área (un metro cuadrado), perpendicular a los rayos del sol en un punto más allá de la atmósfera a una distancia del Sol igual al radio medio de la órbita de la Tierra.

Los primeros experimentos para determinar la constante solar desde la superficie de la Tierra fueron llevados a cabo en el siglo XIX; en ese tiempo los valores de la constante solar estimado por los investigadores presentaban grandes dispersiones que llegaron a ser de más del 100%. A comienzos del siglo XX estas diferencias se redujeron al 10% y para 1960 la diferencia entre los distintos cálculos de la constante solar se redujo al 3%.

Una de las primeras instituciones que desarrollo métodos e instrumentos para medir el valor de la constante solar fue el Instituto Smithsonian. Uno de los primeros en realizar estudios al espectro infrarrojo del sol, fue Longley en 1873; en 1880 fue construido un bolómetro por medio del cual obtuvo el espectro de la radiación solar.

Hasta la introducción de una escala internacional Pireheliométrica (IPS-1956), algunos instrumentos estaban basados en la escala europea de Angstrom y otros utilizaban la escala del Instituto Smithsonian (U.S. escale). La divergencia entre ambas era de alrededor de 3.5 al 5%. La IPS-1956 fue un convenio entre las dos, y a partir de entonces se llevaron a cabo mediciones desde globos y satélites basándose en la nueva escala.

La atmósfera, por los elementos que la constituyen, introduce variaciones en las determinaciones llevadas a cabo debido a que el vapor de agua, ozono, gases atmosféricos y aerosoles atenúan la radiación solar incidente. Para corregir estos efectos se desarrollaron programas y se llevaron a cabo observaciones en diferentes instantes, es decir, con distintos ángulos cenitales durante el mismo día.

El flujo de radiación directa, ϕ_λ , de longitud de onda, λ , que se transmite a través de la atmósfera, está relacionado con el flujo extraterrestre ϕ_{λ_0} mediante la ley de Bouguer-Lambert:

$$\phi_\lambda = \phi_{\lambda_0} e^{-\tau_\lambda m} \quad 3.5$$

$$\ln \phi_\lambda = \ln \phi_{\lambda_0} - \tau_\lambda m \quad 3.6$$

Donde τ_λ es el espesor óptico de la atmósfera medido en la dirección del cenit, m es la masa del aire y θ_z es el ángulo entre el cenit y la dirección del Sol.

Si durante una serie de observaciones las propiedades atmosféricas no cambian, τ_λ es constante, y representando $\ln \phi_{\lambda_e}$ en función de m se obtiene una línea recta que puede ser extrapolada para dar ϕ_{λ_e} en $m = 0$ (cima de la atmósfera). Integrando ϕ_{λ_e} sobre todas las longitudes de onda se obtiene el flujo total ϕ incidente en la cima de la atmósfera y reducido a la distancia media Tierra-Sol por la ley de la inversa de los cuadrados, da el valor de la constante solar, es decir:

$$4\pi R_0^2 I_{cs} = 4\pi R^2 I_0 \quad 3.7$$

Ó

$$I_{cs} = \frac{R^2}{R_0^2} I_0$$

Donde:

I_{cs} es la constante solar

I_0 es la radiación extraterrestre

R_0^2 es la distancia media Tierra-Sol

R^2 es la distancia en el momento de la medición.

La tabla 3.1 muestra el valor de la constante solar en diversas unidades.

Tabla 3.1.a Constante Solar		
Constante solar extraterrestre	A nivel del mar en el deciento (directa)	A nivel del mar Estándar (directo)
1,3530 KW/m ²	0,970	0,930
1,940 Cal/cm ² min	1,39	1,33
4,871 MJ/m ² h	3,492	3,348
0,0324 Cal/cm ² seg	0,0232	0,0222
7,16 BTU/ft ² min	5,13	4,92
429,2 BTU/ft ² h	307,7	295,0

Por encima de la atmósfera terrestre, la intensidad de la luz solar muestra una pequeña variación, ésta variación no está producida por las propiedades del propio Sol sino por los cambios de distancia de la Tierra al Sol debidos a la pequeña excentricidad de la órbita de la Tierra respecto al Sol.

Radiación solar y atmosférica

La gran diferencia de que la radiación solar sea de corta longitud de onda y la radiación atmosférica de larga longitud de onda, se debe a la gran diferencia en orden de magnitud entre la temperatura del Sol y la temperatura del sistema Tierra-atmósfera. La alta temperatura del Sol hace que éste emita una radiación cuyo 99% se encuentre en un rango de longitudes de onda inferiores a 3 μm , mientras que las temperaturas de la atmósfera y la superficie terrestre corresponden a una emisión de radiación comprendida aproximadamente entre 4 y 100 μm .

Absorción por los constituyentes atmosféricos

Al absorber radiación electromagnética se producen transiciones entre los diferentes niveles energéticos de una molécula.

Las transiciones dentro de los niveles vibracionales y rotacionales son las implicadas en la absorción de radiación de onda larga, mientras que las transiciones electrónicas, que necesitan de mayor energía se corresponden con la absorción de onda corta.

La combinación de transiciones entre los niveles de vibración y rotación moleculares son los responsables de las bandas de absorción dentro del infrarrojo próximo y medio que aparece en los espectros de los gases atmosféricos.

Los principales gases emisores de radiación infrarroja en la atmósfera son el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono.

Otros gases que constituyen en menor proporción son el monóxido de carbono, el óxido de nitrógeno, el metano y el óxido nítrico. Teniendo en cuenta sus concentraciones y la absorción de los mismos solo los tres primeros son importantes para la determinación del balance energético del planeta.

Detección de radiación térmica

La medición de radiación térmica es básicamente una medición de flujo de energía radiante. La detección de este flujo de energía puede llevarse a cabo por medio de la medición de la temperatura de una tira de metal delgada que se exponga a la radiación. La tira generalmente se ennegrece para que absorba la mayor parte de la radiación incidente, se construye lo más delgada posible para minimizar su inercia térmica, y, por lo tanto, con esto conseguir las mejores características de respuesta transitoria.

En la figura 3.2 se muestra un diagrama esquemático de un detector general de radiación térmica.

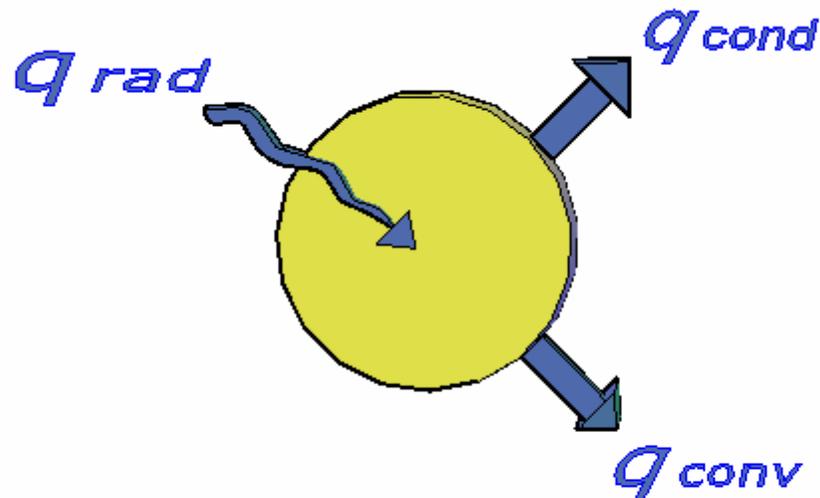


Fig. (3.2) Diagrama esquemático de un detector general de radiación térmica

Se puede observar que la temperatura que alcanza el elemento no es solamente función de la energía radiante que absorbe, sino que también depende de las pérdidas por convección del medio ambiente y por conducción a los soportes.

Para detectar la temperatura del elemento sensor de radiación, se pueden utilizar ya sean termopares o bien termopilas. Las termopilas ofrecen la ventaja de que producen una salida de mayor voltaje, están constituidas por juntas ennegrecidas rodeadas por un anillo de mica que sirve como aislante térmico y eléctrico. La termopila registra la diferencia entre la temperatura de las juntas calientes y la del medio ambiente que rodea al detector, cuenta también con una lente colocada frente al dispositivo, siendo su propósito enfocar la radiación a las juntas de dicha termopila. Además, se utilizan circuitos especiales para la compensación de los cambios en la temperatura ambiente.

La radiación térmica como se comentó anteriormente también puede ser detectada por medio de un bolómetro de metal, el cuál está constituido por una tira delgada, ennegrecida, de un metal que puede ser platino. La temperatura de la tira se puede conocer por medio del cambio que experimenta su resistencia

eléctrica, por la variación de la temperatura, la resistencia eléctrica se puede medir a su vez con un circuito fuente apropiado.

Los termistores se utilizan ampliamente como detectores de radiación térmica, su funcionamiento se basa en dos termistores encerrados dentro de un detector, el cuál está cubierto con una ventana de vidrio que tiene propiedades de transmisión satisfactorias. Uno de los termistores se expone a la radiación incidente que se desea medir, mientras que el otro se protege de ésta, el elemento protegido se conecta al circuito de tal manera que efectúe una compensación continua de la temperatura de la caja del detector.

Los detectores fotoconductivos son utilizados para la medición de radiación, la celda de sulfuro de plomo es utilizada ampliamente en la detección de radiación térmica definida en el rango de 1 a 3 μm de longitud de onda.

Detección de la radiación nuclear

La detección de la radiación nuclear se efectúa haciendo que ésta interactúe con el dispositivo detector de forma que se produzca un proceso de ionización, el grado de ionización se puede medir con circuitos electrónicos apropiados.

Normalmente las operaciones de detección son de dos clases:

- a) Medición del número de interacciones de la radiación nuclear con el detector
- b) Medición del efecto total de la radiación

El primer tipo de medición es un proceso de conteo, mientras que el segundo tipo de medición se puede catalogar como una medición de nivel promedio.

Frecuentemente la operación de conteo no toma en cuenta el nivel energético de la radiación, por lo que la medición de nivel promedio se utiliza para determinarlo.

El contador Geiger-Müller se utiliza típicamente para las operaciones de conteo, mientras que las cámaras de ionización y las placas fotográficas se emplean para la medición del nivel de energía. Los detectores de centelleos se pueden utilizar para efectuar ambos tipos de mediciones.

CAPITULO 4

CALENTAMIENTO DE AGUA CON COLECTORES SOLARES

Como se menciona en los capítulos anteriores existen tres procesos para transmitir calor; por radiación, por convección y por conducción. El Sol emite energía radiante compuesta de fotones u ondas electromagnéticas, dicha energía radiante atraviesa la atmósfera y llega a la superficie terrestre.

Los sistemas solares fototérmicos deben aprovechar al máximo estas formas de transmisión de calor o visto de otra manera, tienen que evitarse las pérdidas de calor por estas tres formas de transmisión de calor.

Los colectores convierten la energía solar en energía calorífica transfiriéndola al fluido de trabajo (agua, aire, aceites, gases de alto peso molecular).

El principio general de funcionamiento de un colector es el llamado efecto invernadero. Cuando la luz pasa a través de una o varias capas de vidrio u otro material transparente, se transmite la radiación, que tiene una longitud de onda corta. Si en el interior de un sistema con un vidrio perfectamente aislado del exterior se coloca un material pintado de negro (el color que absorbe mayor cantidad de radiación), y un sistema de aletas, se absorberá al máximo la radiación, este sistema se calentará y elevará la temperatura, posteriormente ese material emitirá radiación de longitud de onda larga, la radiación emitida dependerá de la temperatura que posea el material pero como la radiación es ahora de longitud de onda larga no podrá atravesar la capa de vidrio y quedará atrapada en el interior, en consecuencia provocará que la parte interna del colector esté a una temperatura más elevada que el exterior, tal y como sucede en un invernadero.

La combinación del efecto invernadero, la absorción de radiación de los objetos negros y el aislamiento para evitar las pérdidas de calor constituyen los principios físicos fundamentales para comprender el funcionamiento de un colector plano

La temperatura que alcanza el agua utilizando colectores solares planos va entre 40 y 60 °C aproximadamente durante casi todo el año.

México es uno de los países más rico en la captación de la radiación solar, se tienen en promedio 5 Kilowatts-hora por metro cuadrado por día, lo que se traduce en un ahorro de energía entre 70 y 85 por ciento al año en promedio.

El principal mercado del colector solar plano se ubica en las grandes ciudades, ya que en ellas el problema de la contaminación ambiental es realmente complejo.

Para la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), estos 5 kilowatts-hora por metro cuadrado equivalen a la energía contenida en un metro cúbico de gas natural, o la de 1.3 litros de gas licuado de petróleo (LP).

En los últimos años China es líder en el mercado de sistemas solares con el 38 por ciento de la capacidad instalada, seguido de Estados Unidos con el 17 por ciento, Japón con el 4.7 por ciento, y la Unión Europea en su conjunto con un 10.4 por ciento.

Los colectores solares más modernos tienen una vida útil de entre 15 y 20 años aproximadamente. Su principal aplicación es en el calentamiento de agua para baños y albercas, aunque también se utilizan para secar productos agropecuarios mediante el calentamiento de aire principalmente.

Los colectores solares planos están constituidos básicamente por:

1. Marco de aluminio anodizado.
2. Cubierta de vidrio templado con bajo contenido en fierro.
3. Enrejado con tubos y aletas de cobre (Placa absorbedora).
4. Cabezales de alimentación y descarga de agua.
5. Aislante, usualmente poliestireno, o unicel
6. Caja del colector de lámina galvanizada.

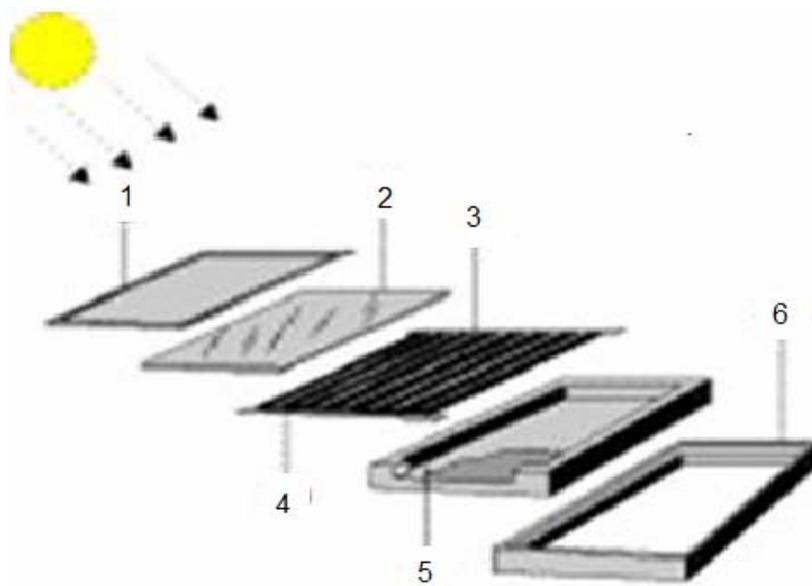


Fig. (4.a) Partes básicas de un colector solar

Para la mayoría de los colectores solares se tienen dimensiones características. En términos generales la unidad básica consiste de un colector plano de 1.8 a 2.1 m² de superficie, conectado a un termotanque de almacenamiento de 150 a 200 litros de capacidad; a este sistema frecuentemente se le añaden algunos dispositivos termostáticos de control a fin de evitar congelamientos y pérdidas de calor durante la noche. Las unidades domésticas funcionan mediante el mecanismo de termosifón, es decir, mediante la circulación que se establece en el sistema debido a la diferencia de temperatura de las capas de líquido estratificadas en el tanque de almacenamiento.

La superficie que se requiere para la instalación de un colector solar, abarca no más de metro y medio por dos metros la que en cualquier azotea o jardín se encuentra disponible.

La posición del colector siempre debe ser inclinada entre 35 y 40 grados, además de tener una orientación hacia el sur, esto es para tener un mejor aprovechamiento del paso del Sol durante el día, de tal forma que no importe la estación del año en que se esté.

Producción de agua caliente

Para la producción de agua caliente en una casa habitación en donde viven 4 personas es más que suficiente un colector solar con las dimensiones descritas anteriormente. La instalación básica se compone de tres elementos, Colector Solar, Tanque de almacenamiento de agua con capacidad de 150 a 200 litro y tuberías de conexión. Además de equipos de bombeo y controles auxiliares.

La circulación de agua del colector al tanque puede efectuarse de dos maneras

- 1 Termosifón
- 2 Forzada mediante bomba circuladora.

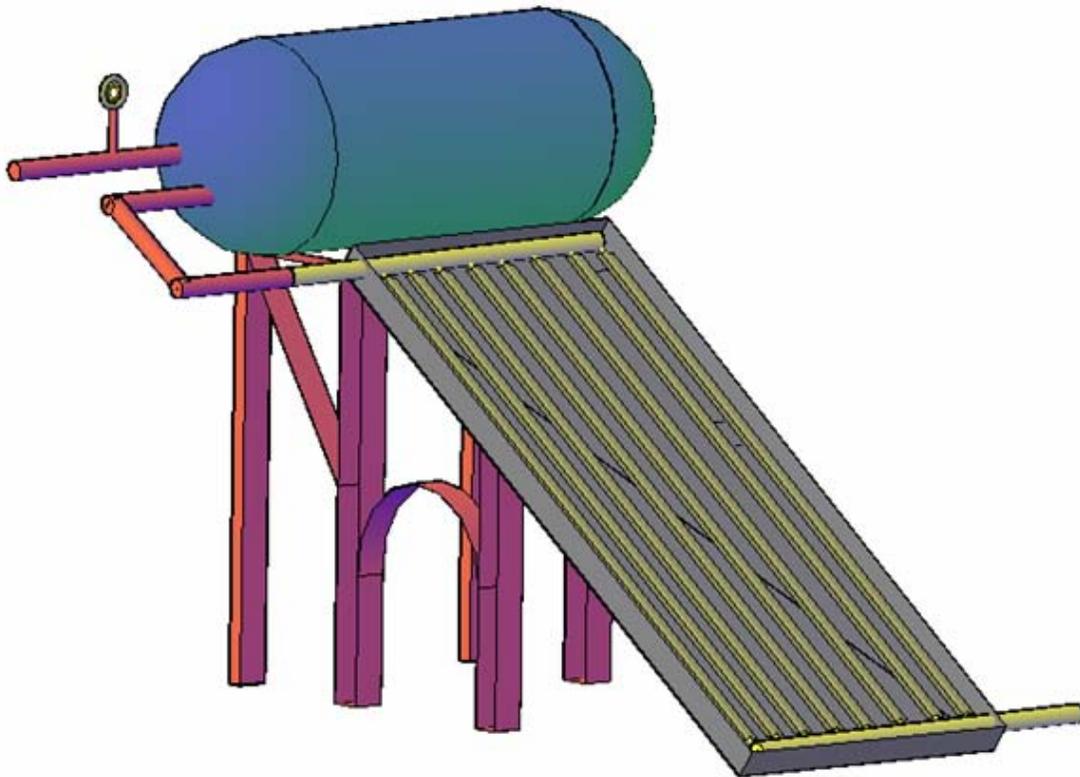


Fig. (4.b) Colector Solar

Cálculos de un colector solar para una casa de 4 personas en el DF.

Según la CONAE La cantidad de agua total que utiliza una persona en un día es aproximadamente de 48 litros, considerando que la mitad es agua caliente, es decir 24 litros diarios.

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Lts}}{\text{Persona}} \times (\text{número de personas}) \times (\text{por ciento}) \quad 4.1$$

$$\text{Capacidad} = 48 \frac{\text{Lts}}{\text{Persona}} \times (4 \text{ de personas}) \times (0.5) = 96 \text{ Lts/día}$$

Conociendo la demanda requerida por el número de habitantes se procede a calcular el calor demandado.

$$Q_D = \frac{m \times C_p \times \Delta T}{1000} \quad 4.2$$

Donde:

m es la cantidad de agua caliente requerida por día.

C_p es el calor específico del agua a presión constante.

ΔT es la diferencia de temperaturas.

De las tablas de propiedades termofísicas del agua se tiene:

$$\rho = 1 \text{ kg/Lt} ; \quad 96 \text{ Lts de agua} = 96 \text{ kg de agua}$$

El calor específico del agua a presión constante es:

$$C_p = 4.186 \frac{\text{KJ}}{\text{kg } ^\circ\text{K}}$$

La temperatura promedio del agua en el DF es de: 15 °C (288 °K)

La temperatura a la que se desea elevar es: 50°C (323 °K)

Sustituyendo en la ecuación 4.2 tenemos:

$$Q_D = \frac{96 \times 4.186 \times (323 - 288)}{1000} = 14.0649 \text{ MJ}$$

Eficiencia del colector solar:

$$\eta_c = \frac{Q_{ud}}{RTD} \times 100 \quad 4.3$$

Donde:

Q_{ud} es el calor útil durante el día, (que es la suma del calor medido por las horas del día, valor obtenido de tablas de la CONAE para el DF)

RTD: Radiación Total Diaria, valor obtenido de tablas de la CONAE para el DF

Sustituyendo en la ecuación 4.3 se obtiene:

$$\eta_c = \frac{12.14 \frac{MJ}{m^2}}{24.84 \frac{MJ}{m^2}} \times 100 = 48.87\%$$

Cálculo del área del colector

$$A_c = \frac{Q_D}{RTD \times \eta_c} \quad 4.4$$

$$A_c = \frac{14.0649 \text{ MJ}}{24.84 \frac{MJ}{m^2} \times 0.4887} = 1.1586 \text{ m}^2$$

Cálculo del termotanque de almacenamiento

El termotanque es el elemento donde se almacena el agua caliente que proporciona el colector solar, debe tener las dimensiones adecuadas para que pueda mantener el agua caliente, la longitud debe ser aproximadamente de 1 metro, esto es para que no exceda las dimensiones del colector. Este termotanque generalmente es colocado en la parte alta del colector como se muestra en la figura (4.b).

Volumen:

$$V = 96 \text{ Lts} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Lts}}$$

$$V = 0.096 \text{ m}^3$$

Cálculo del diámetro interior Di:

$$Di = \sqrt{\frac{V \times 4}{L \times \pi}} \quad 4.5$$

$$Di = \sqrt{\frac{0.096 \text{ m}^2 \times 4}{1 \text{ m} \times 3.1416}}$$

$$D = 0.34 \text{ m} \quad \therefore \quad D = 0.35 \text{ m}$$

Ya que es conocido el diámetro interior, se procede a calcular el diámetro exterior y el espesor del aislante, la figura (4.c) muestra un esquema del radio interior y el radio exterior con aislante, este tipo de aislante sirve para disminuir las pérdidas de calor del fluido en el termotanque.

El material aislante generalmente es Poliuretano ya que su temperatura de trabajo va de entre 50 y 80 °C

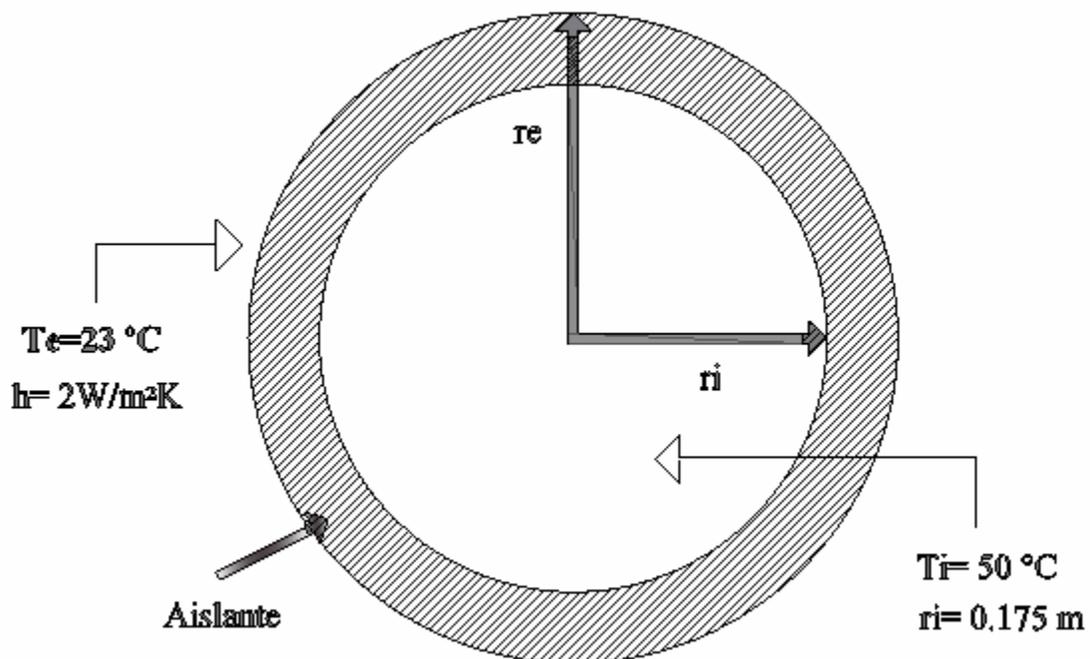


Fig. (4.c) Espesor del aislante

Teniendo la conductividad térmica (k) del aislante y el coeficiente convectivo (h), se procede a utilizar el modelo matemático del radio crítico.

$$k = 0.035 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

$$h = 2 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

$$r_{rc} = \frac{k}{h}$$

$$r_{rc} = \frac{0.035 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}}{2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}} = 0.0175 \text{ m}$$

El modelo matemático dice que si el radio interior es mayor que el radio crítico, cualquier aumento de aislante disminuiría la pérdida de calor en el termotanque. Por esta razón y tomando en consideración diseños de otros fabricantes, se tomara un espesor de aislante de 0.05 m lo cual da un diámetro exterior de 0.40 m.

Costo económico del equipo

La adquisición de un calentador solar, es una opción muy atractiva para la economía familiar ya que a mediano plazo traerá buenos beneficios. Sin embargo la razón por la cual la gente desincentiva a adquirir este tipo de equipos es la inversión inicial.

El costo de un equipo con una capacidad de 150 litros es de \$10,651.87 pesos aproximadamente, más el costo de instalación que va de entre \$2,500 y \$3,000 pesos, ósea:

Costo del equipo + instalación = inversión

$$10,651.87 + 2,500 = 13,151.87 \text{ pesos}$$

La amortización de la inversión se encuentra entre 2 años 4 meses y tres años. Esto se verifica tomando en cuenta el costo total de la inversión entre el gasto mensual de gas al 70% es decir:

$$13,651.87 / ((0.70) \times 550) = 35.5 \text{ meses} = 2 \text{ años } 10 \text{ meses}$$

Como el tiempo de vida útil de los equipos es de aproximadamente 20 años, esta inversión representa 17 años 1 meses del 70% del consumo de gas que tenga, ósea:

$$(0.70 \times 550) = 385 \text{ pesos de ahorro al mes}$$

Suponiendo que el precio del gas no aumentara, después del tiempo de recuperación, se habrá ahorrado en 17 años 1 meses, es decir, 205 meses:

$$385 \times 205 = 78,925 \text{ pesos}$$

Costo mensual sin Colector Solar	Costo mensual con Colector Solar	Porcentaje de ahorro	Ahorro económico mensual	Ahorro total en 17 años 1 mes
\$ 550	\$165	70%	\$ 385	\$ 78,925

CONCLUSIONES

Conclusión 1

En las últimas décadas, las energías renovables han tomado gran importancia tanto a nivel de investigación, como en la sociedad. Se ha avanzado mucho en nuevas tecnologías para aprovechar al máximo sus eficiencias, la razón es muy sencilla nuestro planeta sufre un deterioro muy drástico todos los días.

En todo momento se queman grandes cantidades de combustibles fósiles los cuales a su vez desprenden gases nocivos tanto para nuestro planeta como para los seres vivos.

La detección de la contaminación ambiental y el comienzo de la recuperación de la biosfera están en manos de la humanidad, la cual si quiere salvar su propia existencia tiene que proceder al cambio de los paradigmas actuales y eliminar lo más rápidamente posible las causas que lo ocasionan. Para ello se ha puesto mayor importancia al estudio y control de los Gases de Efecto Invernadero GEI que son el resultado del uso indiscriminado de combustibles fósiles.

Las emanaciones de gases de efecto invernadero GEI han sido ampliamente analizadas, son varios los efectos que provocan dichos gases, entre otros, se extiende a la provocación de lluvias acidas, el descongelamiento de los polos, el aumento en el nivel de los océanos, así como el agotamiento de la capa de ozono.

Los gases de efecto invernadero que existen de manera natural se mantienen con cierto equilibrio dentro de la atmósfera debido a los procesos geofísicos del planeta, tales como el ciclo del agua y el ciclo del carbono. Sin embargo, las actividades humanas han aumentado la concentración de los GEI en la atmósfera.

Origen de algunos GEI:

Bióxido de carbono (CO_2) proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles (el petróleo, carbón, gas natural), en la producción de energía, en el funcionamiento de los procesos industriales, etc.

Metano (CH_4) proviene de la agricultura, el uso del gas natural (ya que el metano es un componente de este gas), la descomposición de los residuos en los rellenos sanitarios, etc.

Óxido nitroso (N_2O) se genera de la producción de ácido nítrico y ácido adípico, el uso de fertilizantes, incineración de residuos, y en la quema de combustibles en el sector transporte.

Perfluorometano, Perfluroetano, hidrofluorocarbonos (HFC) se generan en la producción de aluminio, ciertos solventes de limpieza, aerosoles, etc.

Hexafluoruro de azufre (SF_6) se genera durante la producción de ciertos tipos de aluminio, en fundiciones de aluminio o magnesio, y puede emitirse a la atmósfera por fugas o accidentes con equipo eléctrico de alto voltaje que emplea al SF_6 como aislante.

El cambio climático es un fenómeno que se manifiesta en un aumento de la temperatura promedio del planeta. Este aumento de la temperatura tiene consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo.

La necesidad de aprovechar las fuentes renovables de energía en sustitución de los combustibles fósiles está siendo cada vez más amplia. El desarrollo de nuevas tecnologías hace posible impulsar y optimizar el diseño de los sistemas actualmente utilizados para la captación de la energía solar. La factibilidad técnica y económica de los sistemas solares para uso residencial depende fuertemente de la eficiencia térmica, así como del sistema de captación de radiación solar.

Conclusión 2

Los colectores solares planos son comúnmente utilizados para aplicaciones que requieren temperaturas inferiores a los 60 °C, es decir generalmente uso residencial.

El reto está en conseguir que las energías renovables vayan sustituyendo paulatinamente a los combustibles fósiles, la principal ventaja de las energías renovables es el nulo o casi nulo impacto ambiental ya que reduce el número de contaminantes a la atmósfera, así como los costos económicos en el consumo de combustibles fósiles.

El problema actual consiste en que la sociedad ha hecho un uso preferencial de los hidrocarburos y con esto impactado enormemente el planeta.

La energía termosolar; es la conversión de la radiación solar en calor, que puede lograrse mediante dispositivos conocidos como colectores solares, los cuales alcanzan temperaturas que van de los 40 a 60 °C, el principio básico del calentamiento solar de agua consiste en exponer al sol una superficie metálica, el agua a calentar se pone en contacto térmico con esta superficie y mediante los procesos de transferencia de calor, aumenta su temperatura.

Los procesos de transferencia de calor; Conducción, Convección, y Radiación, juegan un papel muy importante ya que son la base de la captación de la energía solar, estos tres procesos hacen posible el estudio y desarrollo tecnológico de sistemas de energía solar.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Holman, J. P. Transferencia de Calor; México, Ed. Cecsca, 1986
- 2.- Kern, D., Procesos de Transferencia de Calor; Mexico, Ed. Cecsca, 2006
- 3.- Chapman, A. J., Transferencia de Calor; New York, Ed. Mc. Graw Hill, 1988
- 4.- Kreith, F., La transmisión de Calor; México, Ed. Alhambra, 1983
- 5.- Jose A. Manrique., Transferencia de Calor; México Ed. Oxford, 2002
- 6.- Sparrow E. M., Cess R. D., Radiation Heat Transfer; Hoboken, N.Y. , J. Wiley, 2006
- 7.- Duffie, J. A., Beckman, W. A., Energía Solar y Procesos Térmicos; Madrid, Ed. Index 1982
- 8.- Kreider, J. F., Kreith F., Solar Heating and Cooling; Washington, Ed. Scripta Book, 1975
- 9.- José A. Manrique., Energía Solar; fundamentos y aplicaciones fototérmicas; México, Ed. Harla, 1984
- 10.- Manrique, Jose A., Energía Solar; México, Ed. Harla, 1984
- 11.- Jaime Cervantes de Gortari., Fundamentos de Transferencia de Calor; México, Ed. Fondo de cultura económica, 1999
- 12.- Karlekar B. V., Transferencia de Calor; México, Ed. Cecsca, 1986
- 13.- Sigales B., Transferencia de Calor Técnica Volumen 1; Barcelona, Ed. Reverte, 2003
- 14.- Ibañez Plata M., Rosell Polo J. R., Tecnología Solar; Madrid, Ed. Mundir Prensa, 2005
- 15.- Meinel A., Aplicaciones de la Energía Solar; México, Ed. Harla, 1984

- 16.- Brinkworth B. J., Energía Solar para el Hombre; Madrid, Ed. Antigrafiá S.A. 1988
- 17.- Holman J. P., Métodos Experimentales Para Ingenieros; México, Ed. Mc. Graw Hill, 1986
- 18.- Alonso C.A., Rodríguez V.L., Alternativas Energéticas; México, Conacyt, Ed. Fondo de cultura económica, 1998
- 19.- Nestor Quadri., Energía Solar; Buenos Aires, Ed. Alsina, 2003
- 20.- Fernández Salgado, José M., Energía Solar Térmica en la Edificación; Madrid, Ed. AMV, 2004
- 21.- Castro Gil M., Energía Solar Térmica de baja temperatura; Sevilla España, Ed. Progenza, 2000
- 22.- El desafío de las energías renovables; Santiago de Chile, Ed. Eún creemos en los sueños, 2007
- 23.- Guillen Solís Omar., Energías Renovables; una perspectiva ingenieril; México, Ed. Trillas, 2004
- 24.- Menéndez Pérez Emilio., Energías Renovables, sustentabilidad y creación de empleo; una economía impulsada por el Sol; Madrid, Ed. Libros de la catarata, 2001