



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**FUNDACIÓN SOLAR
(DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS)**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A N :

CÉSAR ARMANDO MARTÍNEZ SANTIAGO

JOSÉ CARLOS RAMÍREZ LUCAS

PAVEL NAZUL CORTÉS PÉREZ

ASESOR: ING. JOSÉ ANTONIO SÁNCHEZ GUTIÉRREZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.

2011



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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U.N.A.M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Fundición Solar (Diseño, Construcción y Pruebas)

Que presenta el pasante César Armando Martínez Santiago

Con número de cuenta: 405091836 para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
 Cuautitlán Izcalli, Mex. a 24 de Marzo de 2011.

PRESIDENTE Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez

VOCAL M.E. María Teresa Pacheco Escalona

SECRETARIO Ing. Bernardo Gabriel Muñoz Martínez

1er SUPLENTE Ing. Emilio Juárez Martínez

2º SUPLENTE M.E. Ricardo Alberto Delgadillo Torres



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES CUAUTITLAN
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefa del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Fundición Solar (Diseño, Construcción y Pruebas)

Que presenta el pasante José Carlos Ramírez Lucas

Con número de cuenta: 406082905 para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
 Cuautitlan Izcalli, Mex. a 24 de Marzo de 2011.

PRESIDENTE Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez

VOCAL M.E. María Teresa Pacheco Escalona

SECRETARIO Ing. Bernardo Gabriel Muñoz Martínez

1er SUPLENTE Ing. Emilio Juárez Martínez

2º SUPLENTE M.E. Ricardo Alberto Delgadillo Torres



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES CUAUTITLAN
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefa del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Fundición Solar (Diseño, Construcción y Pruebas)

Que presenta el pasante Pavel Nazul Cortés Pérez

Con número de cuenta: 303846338 para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
 Cuautitlan Izcalli, Mex. a 24 de Marzo de 2011.

PRESIDENTE Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez

VOCAL M.E. María Teresa Pacheco Escalona

SECRETARIO Ing. Bernardo Gabriel Muñoz Martínez

1er SUPLENTE Ing. Emilio Juárez Martínez

2º SUPLENTE M.E. Ricardo Alberto Delgadillo Torres

DEDICATORIAS.

A Dios, por darme la oportunidad de vivir , por que hiciste realidad este sueño, por haberme dado la sabiduría para seguir el camino correcto y la voluntad de elegir mi propio destino, por aquellos momentos de felicidad y de tristeza, que me han enseñado a valorarte y quererte más, y que sin duda alguna quedarán por siempre en mi memoria.

A mi Madre, a quien le debo todo en la vida y nunca hallaré la manera de pagárselo, por que siempre tuviste una palabra de aliento cuando más la necesité, por estar a mi lado en todo momento, principalmente en los momentos difíciles. Gracias mamá por tus consejos, por el amor que siempre me has dado, por haber inculcado en mí el don de la perseverancia, te agradezco el cariño, la comprensión y tu infinita paciencia, gracias por haberme dado la fuerza para terminar mi carrera profesional y mil gracias por tu gran ejemplo de superación, eres lo más importante en mi vida y siempre serás mi modelo a seguir.

A mi Padre, por todo el apoyo que me ha dado, por haberme brindado la oportunidad de tener una carrera profesional, por confiar y creer en mí, gracias por todo papá, sobre todo, por haberme regalado la vida.

A mis Hermanos, que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas, y que son una parte importante en mi vida. Gracias por su apoyo y amistad.

A mi Asesor, por su apoyo y su paciencia para la elaboración de ésta tesis, por su enseñanza tan valiosa, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de mi formación profesional, pero principalmente por su invaluable amistad.

“No voy a aprender acerca del fuego a fuerza de pensar en el fuego, sino a fuerza de hacer arder las cosas”

(Carla Needleman)

César Armando Martínez Santiago.

DEDICATORIA

A mis padres, Ismael Ramírez Vázquez y Juana Lucas Méndez a los cuales les debo la vida así como lo que eh hecho con ella, por sus consejos, regaños e incluso esos castigos merecidos que sirvieron para forjar mi carácter y hacerme entrar en razón en momentos de terquedad.

Gracias a mi padre que con su sudor, esfuerzo y sacrificio me brindó la oportunidad de cursar una carrera profesional, además de criarme con buen ejemplo y rigor, me dio la fortaleza para no darme por vencido en las situaciones difíciles, además de contar con todo su apoyo para enfrentar y resolver mis problemas.

Gracias a mi madre que con su cariño, ternura y comprensión me aconsejo, alentó para no darme por vencido, porque diariamente al llegar a casa me esperaba con los brazos abiertos y a pesar de los malos ratos así como de los enojos que le hacía pasar siempre estuvo allí para ayudarme.

A mis hermanas, Rosa Iveth Ramírez Lucas y Diana Isabel Ramírez Lucas esperando que sea una motivación para que sigan adelante y sin importar la adversidad continúen luchando día a día por sus sueños y metas.

A mi novia, Mónica Primero Chino que ha tenido la paciencia para soportarme en esta travesía estando a lo largo de mi carrera en las buenas así como en las malas, brindándome todo su amor, cariño y comprensión.

A mis compañeros y amigos, que de alguna manera me apoyaron y/o motivaron para seguir adelante, con una palabra de aliento, con un consejo e incluso con el hecho de no creer en mí, pues todo ello me sirvió para motivarme e impulsarme en este escalón.

A mi asesor, Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez que me brindó la oportunidad de trabajar en este proyecto así mismo de las múltiples asesorías, más bien clases de energía solar, cuidando cada detalle durante la realización del proyecto de tesis, sin dejar de sorprenderme por su conocimiento y experiencia en este ámbito.

José Carlos Ramírez Lucas

DEDICATORIA

A mis Padres, Lorenzo Cortés Juárez e Irma Pérez Cazales por regresarme al camino del que me había desviado y darme el apoyo y fuerza para concluir mis metas, que hoy gracias a ellos he logrado. Espero en un futuro próximo devolverles un poco de lo mucho que me han dado. Les agradezco por confiar en mí y este logro es resultado, del buen trabajo que han realizado como padres, los quiero mucho.

A mis hermanos, Zaira y Canek, para que sean constantes y sigan adelante logrando sus objetivos y deseo que este trabajo los impulse para que el día de mañana obtengan mucho éxito. Y al igual que mis padres han sido elementales en mi vida, por eso los aprecio y los quiero mucho.

Pavel Nazul Cortés Pérez

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarnos la oportunidad de tener una formación profesional al abrirnos sus puertas.

Al Ingeniero José Antonio Sánchez Gutiérrez por ser asesor y jurado, en la realización de este proyecto de tesis sin dejar a un lado su incomparable dedicación, paciencia y entusiasmo, por todos los conocimientos que nos brindó y que junto con las asesorías recibidas nos hicieron crecer profesionalmente.

A los profesores M.E. María Teresa Pacheco Escalona, Ing. Bernardo Gabriel Muñoz Martínez, Ing. Emilio Juárez Martínez, M.E. Ricardo Alberto Delgadillo Torres que integraron el jurado de revisión de tesis, que con sus comentarios enriquecieron el contenido de este trabajo.

Al Ing. Humberto Neri Mondragón del área de manufactura por los conocimientos y ayuda para realizar el molde de fundición, así como a la señorita del almacén del laboratorio de Mecánica LIME II por la facilidad que nos brindó para el uso de material y de herramientas.

Finalmente, a los compañeros y amigos, con los que compartimos aulas, vivencias, dificultades, alegrías e incluso llanto. También para aquellos que abandonaron la carrera, dándonos la enseñanza de que no era fácil y por lo cual tendríamos que esforzarnos más siendo constantes en nuestra lucha diaria.

César Armando Martínez Santiago
José Carlos Ramírez Lucas
Pavel Nazul Cortés Pérez

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Fuentes de Energías renovables	2
1.2 Fuentes de Energías no renovables	6
1.3 Ozono, smog, la lluvia ácida y el efecto invernadero	8
CAPÍTULO 2: CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ENERGÍA SOLAR	11
2.1 El Sol	11
2.2 Estructura solar	11
2.3 Constante solar	21
2.4 Radiación solar	22
CAPÍTULO 3: TRAYECTORIAS TIERRA – SOL	26
3.1 Leyes de Kepler	26
3.2 Movimientos de la tierra	29
3.3 Perihelio y afelio	30
3.4 Distancia media Tierra – Sol	30
3.5 Movimiento de traslación	31
3.6 Movimiento de rotación	32
3.7 Líneas imaginarias de la Tierra	35
3.8 Puntos Cardinales y coordenadas geográficas	36
CAPÍTULO 4: ECUACIÓN DEL TIEMPO	39
4.1 Definición de la ecuación del tiempo	39
4.2 Ángulos solares básicos y derivados	41
4.3 Ángulos horarios para la salida y puesta del Sol y la duración del día	48

CAPÍTULO 5: PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	50
5.1 Conducción	50
5.2 Convección	72
5.3 Radiación	86
CAPÍTULO 6: CONCENTRADORES SOLARES	103
6.1 Lugar geométrico de la parábola	104
6.2 Geometría del concentrador	107
6.3 Imagen solar	112
6.4 Razón de concentración	114
6.5 Energía disponible en el receptor	116
6.6 Tipos de concentradores	117
CAPÍTULO 7: DISEÑO DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN	127
7.1 Geometría del concentrador	127
7.2 Balance térmico	133
7.3 Balance energético	143
CAPÍTULO 8: CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	146
8.1 Construcción del sistema de fundición	146
8.2 Pruebas y resultados	157
CONCLUSIONES	163
APÉNDICE	165
BIBLIOGRAFÍA	171

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles genera grandes repercusiones hacia el medio ambiente y su gran demanda tarde o temprano provocará escasez, llevándonos a una crisis energética mundial. Por eso es necesario recurrir a otras fuentes de energías alternativas como la que nos brinda el sol.

En tiempos actuales el estudio de la energía solar es uno de los temas más importantes. Para poder aprovechar de manera eficiente la energía solar que incide sobre la superficie de la tierra es imprescindible estudiar a fondo la naturaleza de la radiación solar y sus características de incidencia sobre la tierra.

La energía solar térmica es un método de aprovechamiento en el que se transforma la energía radiante del sol en calor, que sirve, por ejemplo, para la producción de agua caliente, calefacción, producción de energía mecánica y a partir de ello electricidad, etc. El lugar en donde se da la transformación de la energía radiante en calor recibe el nombre de captador solar. El uso de estos sistemas de captación es muy extenso en nuestros días por lo que merecen un estudio intensivo.

Este trabajo de tesis se enfoca, en el diseño y construcción de un sistema de fundición solar, por medio de un concentrador solar parabólico.

Perturbaciones ambientales.

En los últimos dos siglos se han producido cuatro hechos que han creado problemas ambientales que superan la capacidad de asimilación de la naturaleza.

Primero, un crecimiento explosivo de la población que ha creado enormes presiones ambientales.

Segundo, este crecimiento, en particular en los países desarrollados, ha estado acompañado de nuevos procesos industriales que con sus desperdicios alteran el ambiente.

Tercero, el crecimiento poblacional y la industrialización han dado origen a la urbanización, es decir, al movimiento de personas que emigran de pequeños asentamientos a ciudades y pueblos, lo cual contribuye a intensificar los problemas ambientales en función de la densidad de personas e industrias.

Por último, el crecimiento explosivo del uso de energía de origen fósil.

En general, estos acontecimientos han tenido un impacto negativo y desastroso en ciertas áreas del ambiente físico. El éxito económico y los elevados niveles de vida en los centros urbanos de las naciones desarrolladas han estado acompañados del consumo de recursos naturales como agua, madera, depósitos minerales, suministro de energía y terrenos.

Las crecientes demandas domésticas e industriales y el correspondiente agotamiento de recursos no pueden continuar de manera indefinida sin ocasionar un desorden ambiental grave.

Fuentes de energía primaria.

Las fuentes de energía primaria disponibles para nuestro uso frecuente se clasifican como renovables y no renovables.

1.1 FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES.

Se llama energía renovable la que, administrada en forma adecuada puede explotarse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible (en la Tierra) no disminuye a medida que se aprovecha. Para tener un esquema de desarrollo sustentable, es indispensable que la mayoría de los recursos y particularmente la energía, sean del tipo renovable. La principal fuente de energía renovable es el Sol.

1 Energía solar.

Entre las nuevas energías, la solar ocupa un lugar destacado, según informes de investigadores y organismos internacionales, será la que lleve mayor peso dentro de ese porcentaje del 2% al 3% de abastecimiento energético mundial, lo que significa que es la nueva fuente energética que nos ofrece mayores posibilidades.

Los diversos sistemas de colección solar que existen actualmente tratan de utilizar de la manera más eficiente la cantidad de energía que emite el Sol y que llega a la Tierra en forma de radiación solar. El Sol es un gigantesco reactor nuclear de fusión, es una enorme masa gaseosa, formada fundamentalmente por hidrógeno, helio y carbono, en ella se producen de manera continua reacciones nucleares mediante las cuales dos átomos de hidrógeno se fusionan, dando lugar a un átomo de helio y liberando una gran cantidad de energía, según un cálculo teórico basado en la ley de Planck, permite afirmar que el flujo total de energía emitido por el Sol en todo el rango de frecuencias equivale a 3.8×10^{23} kW.

Entre las ventajas que ofrece la energía solar, se suele citar su carácter gratuito y el ser inagotable a escala humana. Además cabe señalar, que mediante convenientes procesos de concentración, pueden alcanzarse con ella hasta 3000°C de temperatura que en un principio permiten poner en marcha ciclos termodinámicos de alto rendimiento. Por otra parte la energía solar llega a la Tierra de forma semialeatoria y dispersa, con fuertes oscilaciones según la hora del día, las condiciones climatológicas, las zonas del planeta y las estaciones del año, además no puede ser almacenada tiene que ser transformada de inmediato en otra forma de energía (calor, electricidad).

Por último su aprovechamiento exige disponer de sistemas de captación de grandes superficies y algunos de sus principales componentes individuales resultan todavía muy caros, en otras palabras que si bien la energía solar que llega a la Tierra es gratuita, la energía obtenida por el hombre a partir de la energía solar es aún muy costosa.

La energía solar, como recurso energético terrestre, está constituida únicamente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio, la zona norte es una de las más soleadas del mundo. Se mencionan algunas aplicaciones de la energía solar.

Directa. Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de viviendas. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar.

Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en proceso de producción con tecnología simple.

Térmica. Se denomina térmica la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

Fotovoltaica. Se llama fotovoltaica la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

2 Energía eólica.

La energía eólica es la energía que se extrae del viento. Las aplicaciones más comunes son: transporte (veleros), generación eléctrica y bombeo de agua. La energía eólica es derivada de la energía solar, porque una parte de los movimientos del aire atmosférico se debe al calentamiento causado por el Sol.

3 Energía de la biomasa.

La forma más antigua de aprovechamiento de la energía solar, inventada por la naturaleza misma es la fotosíntesis. Mediante este mecanismo las plantas elaboran su propio alimento. Se basa en la utilización de la energía química contenida en la materia orgánica y algunos residuos, utilizables como combustibles, para la obtención de calor o electricidad.

4 Energía hidráulica.

La energía hidráulica es la que se obtiene a partir de las caídas de agua, artificiales o naturales. Típicamente se construyen presas en los lugares con una combinación de gasto anual de agua y condiciones orográficas adecuadas. Estrictamente esta también es una forma derivada de la energía solar, porque el Sol provee la fuerza impulsora del ciclo hidrológico. Sin embargo tradicionalmente se ha considerado como una fuente de energía aparte.

5 Energía mareomotriz.

Energía de las olas. Esta energía consiste en aprovechar el vaivén de las olas del mar para generar energía eléctrica. Las olas son a su vez producidas por efectos del viento sobre el agua. Por lo tanto también es una forma de energía derivada de la energía solar.

Energía de las mareas. En algunas regiones costeras se dan mareas especialmente altas y bajas. En estos lugares se ha propuesto construir grandes represas costeras que permitirían generar energía eléctrica con grandes volúmenes de agua, aunque con pequeñas diferencias de altura, es como la energía hidráulica pero su origen es la atracción gravitacional del Sol y principalmente de la luna en vez del ciclo hidrológico.

1.2 FUENTES DE ENERGÍAS NO RENOVABLES.

Las fuentes de energía no renovables son las que a escala humana no son capaces de crearse al mismo ritmo en que se consumen. Están almacenadas comúnmente en el subsuelo y a medida que se consumen se van agotando, las reservas disponibles están sujetas a factibilidad técnica y económica de su explotación, al descubrimiento de nuevos yacimientos, también al ritmo de extracción y consumo.

1 Energía fósil.

Son el carbón, el gas natural y los productos petrolíferos. Son productos formados a partir de la descomposición parcial de grandes masas de seres vivos que según la geología vivieron hace millones de años.

Petróleo y sus derivados. El petróleo es una mezcla de una gran cantidad de hidrocarburos en fase líquida, mezclados con una variedad de impurezas. Por destilación y otros procesos se obtienen, las diversas gasolinas, el diesel, la turbosina, la tractolina, el chapopote, etc. En México este es un producto muy abundante pero sobreexplotado para fines energéticos y financieros, cabe aclarar que a nivel mundial ya no es tan abundante.

Gas natural. El gas natural está compuesto principalmente por metano y corresponde a la fracción más ligera de los hidrocarburos, por lo que se encuentra en los yacimientos en forma gaseosa.

Carbón mineral. El carbón mineral es principalmente carbono, también de origen fósil que se encuentra en grandes yacimientos en el subsuelo. Los problemas ecológicos que causa son aún mayores que los inherentes al petróleo y sus derivados.

2 Energía nuclear.

La energía nuclear se obtiene de la modificación de los núcleos de algunos átomos, muy pesados o muy ligeros. En esta modificación, cierta porción de su masa se transforma en energía. La liberación de energía nuclear, por tanto tampoco involucra combustiones, pero si produce otros subproductos agresivos al ambiente.

Fisión. La fisión nuclear consiste en la desintegración de átomos pesados, como ciertos isótopos de uranio y de plutonio, para obtener átomos más pequeños y la liberación de una gran cantidad de energía en forma de calor. Dentro de la fisión existen diversas variantes. Esta es la forma con que operan los reactores nucleares comerciales.

3 Energía geotérmica.

La energía geotérmica consiste en extraer calor del magma incandescente de la Tierra, por medio de vapor. Mediante procesos térmicos, es posible generar electricidad, en las plantas llamadas geotermoeléctricas. El magma se encuentra cerca de la superficie terrestre en las zonas con gran actividad volcánica, y es donde es más explotable. En algunos casos el vapor o el agua caliente brotan espontáneamente. En otros, es necesario inyectar agua en pozos y extraerla como vapor.

Un factor importante que influye en el uso futuro de las fuentes de energía es el impacto ambiental y social de cada una de ellas. Esto se aplica en particular al uso del petróleo y la energía nuclear.

El daño ambiental que se causa al dejar escapar a la atmosfera cantidades siempre en aumento de residuos de la quema de derivados del petróleo puede poner límites al uso de esos combustibles. Aunque la eliminación de los gases azufrados y nitrogenados del proceso de combustión plantea el mayor desafío técnico.

La energía nuclear tiene peligros potenciales de radiación de bajo nivel, desechos nucleares, accidentes nucleares y la proliferación de armas nucleares lo que la hacen intolerable como fuente futura.

1.3 OZONO Y SMOG, LALLUVIA ÁCIDA Y EL EFECTO INVERNADERO.

Ozono y smog.

El smog está hecho principalmente de ozono al nivel del suelo (O_3) pero también contiene un sinnúmero de químicos incluyendo monóxido de carbono (CO), partículas de materiales como polvo y hollín, compuestos orgánicos volátiles como benceno, butano y otros hidrocarburos. El ozono destructivo a nivel del suelo no debe ser confundido con el ozono que se encuentra en capas elevadas de la estratosfera que protege la Tierra de los rayos ultravioleta del Sol.

El otro contaminante importante del smog es el monóxido de carbono, que es un gas incoloro, inodoro y venenoso. Es emitido principalmente por vehículos automotores y puede alcanzar niveles peligrosos en áreas con tráfico altamente congestionado. Priva a los órganos del cuerpo de su capacidad de obtener suficiente oxígeno al unirse con los glóbulos rojos que ordinariamente conducen oxígeno.

En bajos niveles el monóxido de carbono disminuye la cantidad de oxígeno suministrado al cerebro así como en otros órganos y músculos, disminuye los reflejos, también las reacciones del cuerpo y debilita el razonamiento. En niveles altos puede ser fatal como demuestran numerosas muertes causadas por autos que se calientan en estacionamientos cerrados o con fugas internas de gas en el escape.

Lluvia acida.

Los combustibles fósiles son mezclas de varios químicos que incluyen pequeñas cantidades de azufre.

El azufre contenido en el combustible reacciona con el oxígeno para formar dióxido de azufre (SO_2), que es un contaminante del aire. Los óxidos de azufre y óxidos nítricos reaccionan con vapor de agua y otros químicos en la parte alta de la atmósfera en presencia de los rayos solares para formar ácidos nítrico y sulfúrico. Los ácidos formados comúnmente se disuelven en las gotas de agua suspendidas en las nubes y niebla. Estas gotitas cargadas de ácido, que pueden ser tan ácidas como el jugo de limón, son lavadas desde el aire hasta el suelo por la lluvia y la nieve. A esto se le conoce como lluvia ácida. El suelo es capaz de neutralizar una cierta cantidad de ácido pero las cantidades producidas por las plantas de energía que utilizan carbón con alto contenido de azufre, que es barato, han rebasado esta capacidad y como resultado se tiene que muchos lagos y ríos en las grandes áreas industriales como Nueva York, Pennsylvania y Michigan se han vuelto demasiado ácidas para permitir el crecimiento de peces. Los bosques en esas áreas también presentan una muerte lenta debido a la absorción de los ácidos a través de sus hojas, tallos y raíces. Aún las estructuras de mármol se deterioran con la lluvia ácida.

El efecto invernadero: el cambio de clima y calentamiento global.

Se ha observado que cuando se deja el automóvil directamente bajo los rayos del Sol en un día soleado, el interior del auto se calienta mucho más que el aire exterior y la cuestión es ¿Por qué el automóvil actúa como una trampa de calor? Esto se debe a que el vidrio, en los grosores empleados comúnmente, transmite más del 90% de la radiación en el rango visible y es prácticamente opaco (no transparente) a las radiaciones de longitudes de onda más larga, en la región infrarroja. Por tanto, el vidrio permite que la radiación solar entre libremente pero bloquea la radiación infrarroja emitida por las superficies interiores. Esto provoca un aumento en la temperatura como resultado de la energía creada en el auto.

Los efectos de este calentamiento se conocen como efecto invernadero ya que se utiliza principalmente en los invernaderos.

El efecto invernadero también se manifiesta, a mayor escala, sobre la Tierra.

La superficie de la Tierra, que se calienta durante el día como resultado de la absorción de la energía solar, se enfría por las noches irradiando parte de su energía hacia el espacio profundo como radiación infrarroja.

El dióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua igualmente trazas de algunos otros gases como metano y óxidos de nitrógeno actúan como una manta que conservan tibia a la Tierra por la noche por el bloque de calor que se irradia desde la Tierra. Por ello es que se llaman “gases de invernadero”, donde el CO₂ es el componente principal.

El efecto invernadero permite la vida sobre la Tierra ya que la conserva tibia. Sin embargo la cantidad excesiva de estos gases, perjudican el delicado balance atrapando demasiada energía, lo que ocasiona un aumento en la temperatura de la Tierra y el cambio de clima como consecuencia.

Estas consecuencias indeseables del efecto invernadero se conocen como “calentamiento global” o “cambio de clima global”. El calentamiento global ha sido preocupante en las últimas décadas debido al uso excesivo de combustibles fósiles tales como el carbón, productos del petróleo y gas natural.

Por razones económicas, ambientales y políticas es necesario buscar otras fuentes alternativas de energía, que sean a la vez económicas, abundantes, limpias y que preserven el equilibrio ecológico. En consecuencia el uso de energías renovables debería fomentarse en el mundo entero, con incentivos necesarios para hacer que la Tierra sea un mejor lugar para vivir.

Capítulo 2

CONCEPTOS BÁSICOS DE ENERGÍA SOLAR

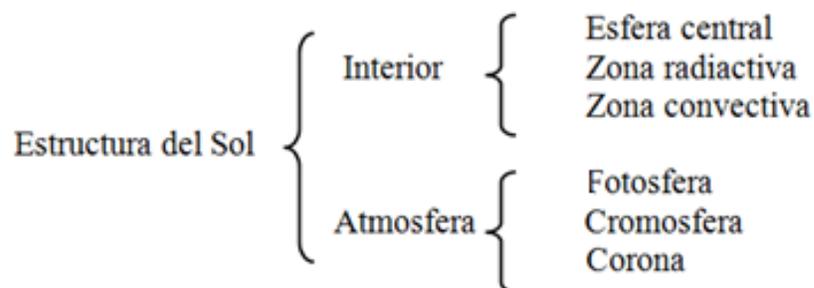
2.1 EL SOL.

El Sol es la estrella más próxima a la Tierra, se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros. Es una estrella típica G2 de mediana edad, ni demasiado grande ni muy brillante. De acuerdo con estudios realizados sobre la evolución de este tipo de estrellas, el Sol permanecerá esencialmente inalterable por varios miles de millones de años; ha cambiado muy poco en los últimos tres mil millones de años y se estima no cambiará mucho en los próximos tres mil millones de años, razón por la cual puede considerarse como una fuente renovable e inagotable de energía para la Tierra.

2.2 ESTRUCTURA SOLAR.

La composición del Sol es extremadamente compleja y los fenómenos que ocurren en él desafían el análisis con términos terrestres.

El Sol, formado de envolturas concéntricas, no está delimitado como si fuera un globo sólido. Los gases muy densos en el centro, ocupan alturas diferentes según su estado físico; por lo tanto es difícil asignarles un límite o un nivel, a las diferentes capas solares.



La región interna se divide en tres zonas, una esfera central, una zona radiactiva y una zona convectiva. En la esfera central se genera la energía que se transporta rumbo al exterior, en primer lugar por la zona radiactiva y posteriormente por la zona convectiva. La capa superficial de gas que emite esta energía hacia el espacio se llama fotosfera y forma, junto con las siguientes capas de gas más externas, la atmósfera del Sol. Esta atmósfera tiene tres componentes, la fotosfera, la cromosfera y la corona.

La fotosfera es lo que observamos como la superficie del Sol. En ella se observan una de sus características más peculiares, las manchas solares. Inmediatamente después de la fotosfera esta la cromosfera, dentro de la cual se localizan las ráfagas, este es el fenómeno más violento y energético que tiene lugar en la atmósfera solar. La corona es la componente más externa de la atmósfera solar y es, por mucho, la más extensa. La enorme cantidad de energía que emiten las estrellas solamente puede ser producida por reacciones nucleares.

Del Sol salen cada segundo 400 cuatrillones de watts, esto es equivalente a la transformación en energía de casi 5 millones de toneladas de masa.

La transformación de materia en energía, por medio de las reacciones nucleares ocurre en la parte central de las estrellas, es una densa y pequeña esfera central.

La esfera central del Sol tienen un radio igual a la tercera parte de su radio total, aproximadamente 200000 kilómetros, o sea casi cuatro veces el tamaño del gigante planeta Júpiter.

En el interior de una estrella el fenómeno fundamental es la conversión de materia en energía, gracias a esto se mantienen brillantes y calientes hasta por muchos miles de millones de años. La forma de convertir materia en energía no es siempre la misma. Existen distintas reacciones en los diferentes tipos de estrellas. Esto es precisamente lo que produce los cambios de brillo, tamaño y color a lo largo de la existencia de una estrella.

Mientras la energía producida en las entrañas del Sol sea suficiente para contrarrestar la contracción gravitacional de la esfera de gas, la estrella se mantendrá en equilibrio, lo que ocurre durante la mayor parte de su existencia. Si la energía producida en su interior disminuye, las estrellas tienden a contraerse, recíprocamente si la energía aumenta, se expanden.

En las últimas etapas de la vida de una estrella las reacciones nucleares se agotan pues se acaba el “combustible” y termina contrayéndose. Las estrellas que se expanden para convertirse en supergigantes o en gigantes rojas deben la transformación a que en su interior empiezan a predominar un nuevo tipo de reacciones nucleares derivadas de la composición química de sus nuevos materiales, producidos por las de reacciones nucleares precedentes.

Núcleo solar, zona de radiación y zona convectiva.

En el núcleo la densidad y la presión son tan altas que dan lugar a una temperatura de 15 y 16 millones de grados, suficientes para que se lleven a cabo reacciones nucleares. La fusión es la fuente de la enorme cantidad de energía que fluye del interior a la superficie del Sol de donde escapa hacia el espacio prácticamente sin obstáculo, ya que los gases superiores de la atmosfera son casi transparentes a esa radiación.

En el núcleo del Sol, la energía liberada en las reacciones nucleares es en forma de rayos X de alta energía. Debido a la interacción de la radiación con la materia, aquella va perdiendo energía mientras se abre paso hacia el exterior y va interaccionando con los componentes del medio.

El transporte de energía hacia el exterior se lleva a cabo mediante dos tipos de procesos:

Primero por transferencia de radiación, es decir, al absorberse, dispersarse y reemitirse la misma en parte del interior solar (de ahí el nombre de zona radiactiva) y luego por convección en la parte externa, por debajo de la superficie del Sol, donde la convección es más efectiva que la transferencia radiactiva.

La energía es llevada hacia arriba por el gas caliente ascendente; la energía se difunde a medida que el gas ascendente se expande es allí que el gas se enfría y desciende. A esta capa del Sol se le conoce como zona convectiva la cual se extiende desde unos 8 décimos de radio solar hasta la superficie.

Debido a la rotación del Sol, en el gas ionizado o plasma, tanto del núcleo como de la zona convectiva, se generan corrientes eléctricas. Estas a su vez, dan lugar a un campo magnético general de forma dipolar. Este campo en la superficie del Sol, alrededor de las regiones polares, tiene una intensidad de alrededor de seis veces más intenso que el de la Tierra en el ecuador.

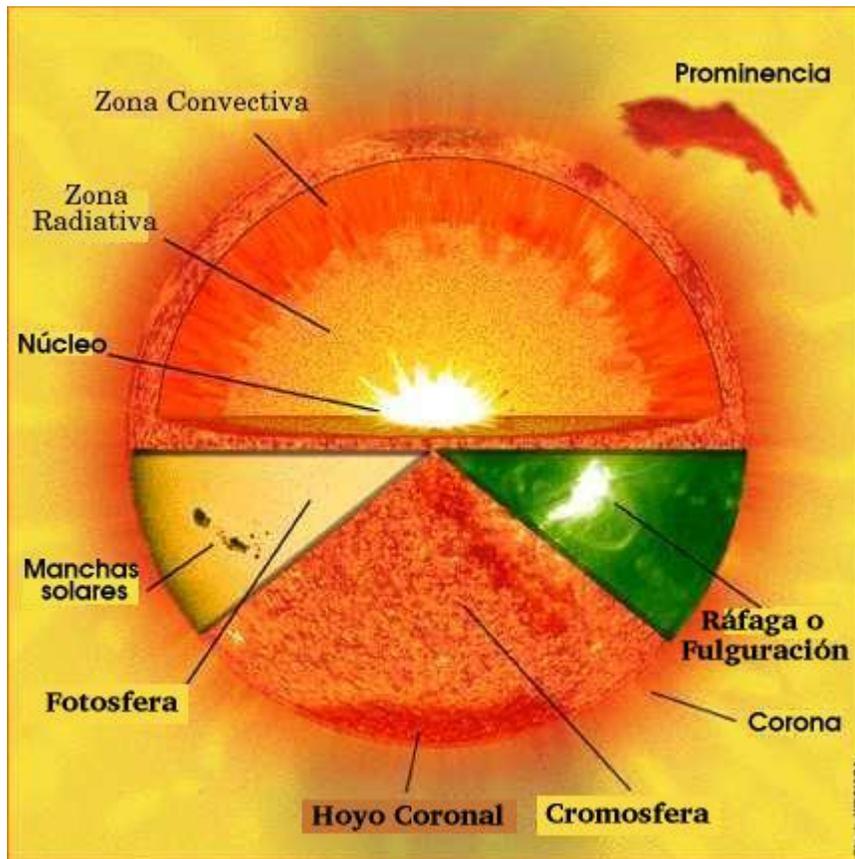


Figura 2.2.1 Estructura interna del Sol, así como la estructura de su atmósfera.

Fotosfera.

La superficie visible se conoce como *fotosfera* (que significa esfera de luz) pero no es una superficie sólida como la de la Tierra, es una capa delgada de gas, de unos 300km de espesor, desde las que se emite prácticamente toda la luz del Sol.

Su temperatura disminuye con la altura, desde unos 8500K en su base hasta unos 4500K en la parte superior, con una temperatura media de aproximadamente 5800K. En fotografías de buena resolución, la fotosfera aparece como una región granulada.

Cromosfera.

Por arriba de la fotosfera la densidad del gas decrece rápidamente. La región desde la “superficie” de la fotosfera hasta una altura de aproximadamente 2500km es la que conocemos como cromosfera. Comienza en donde el gas alcanza una temperatura mínima de 7000K. En esta región se disipa energía mecánica generada probablemente por la convección o la radiación, por lo que la temperatura se incrementa hacia afuera, pasando por la llamada zona de transición, que es una capa delgada, de algunas centenas de kilómetros, en la que la temperatura aumenta bruscamente desde unos 25000K hasta el millón de grados.

Corona Solar.

Una vez que la temperatura alcanza el millón de grados, se tiene la última capa que es la corona, región sumamente tenue que, debido a la alta temperatura, se expande continuamente hacia el espacio formando el viento solar. La temperatura de la corona es casi constante (un millón de grados en el Sol y 100000 grados a la altura de la órbita de la Tierra, que está a 150 millones de kilómetros).

Manchas Solares.

En la fotosfera y en la corona, el campo magnético que emerge genera patrones muy complejos que dan lugar a las manchas solares, regiones activas, grandes arcos coronales y hoyos coronales. Todos ellos forman parte de lo que conocemos como actividad solar.

Las manchas son regiones oscuras de la fotosfera, en donde el campo magnético es muy intenso. La presencia del campo magnético inhibe la circulación de material y las colisiones entre los componentes del mismo, por lo que el gas está varios miles de grados más frío que los alrededores, por tanto, radia menos hacia el espacio, de ahí que se vean oscuras en contraste con su entorno más brillante.

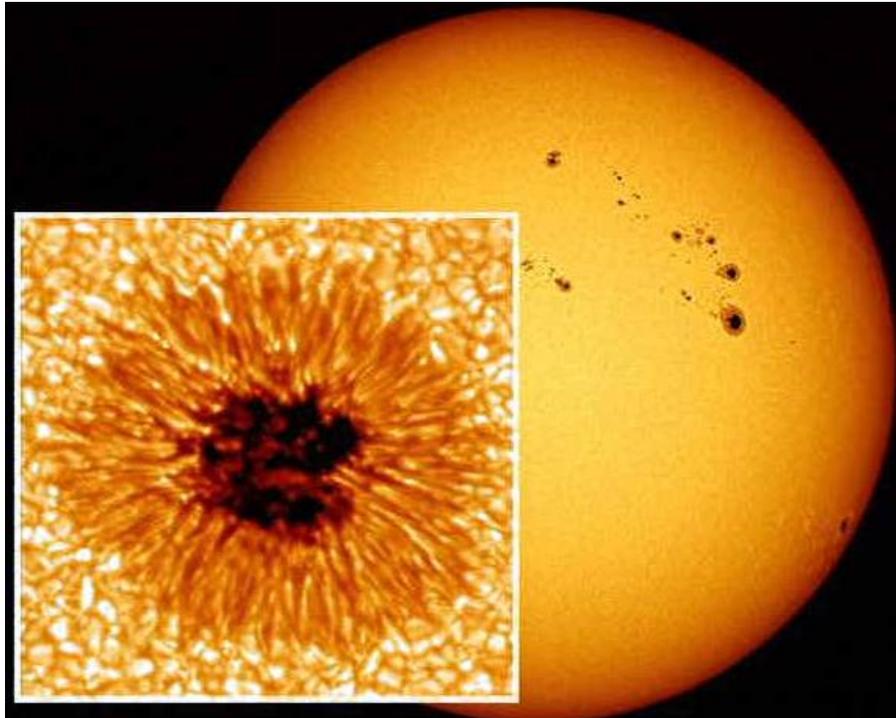


Figura 2.2.2 Una mancha solar observada en luz visible. La zona oscura es la umbra, que está rodeada por una zona filamentosa que se conoce como penumbra.

El espectro del Sol.

La mayoría de lo que se conoce acerca del Sol se deduce del análisis de su espectro. El espectro visible del Sol, como el de la mayoría de las demás estrellas, consiste en un continuo (espectro continuo) con rayas oscuras de absorción. Una forma muy simplificada de considerarlo es que el espectro continuo es emitido por la fotosfera y que las rayas de absorción se producen al pasar esta radiación a través de la atmósfera solar más rarificada encima de la base de la fotosfera.

De hecho la emisión y la absorción tienen lugar en toda la atmósfera solar (fotosfera y cromosfera) pero, por lo que concierne a la luz visible, los efectos de la absorción se vuelven más importantes al aumentar la altura sobre la base de la fotosfera.

El espectro electromagnético.

En el Sol y en las estrellas no solo existe emisión de radiación electromagnética, sino que también hay absorción de radiación, ambas con diferentes intensidades en diferentes longitudes de onda. La intensidad de emisión y absorción en todas las longitudes de onda es lo que se conoce como el espectro electromagnético.

Según los materiales que posean las estrellas y los fenómenos físicos que se lleven a cabo en ellas emiten o absorben ondas electromagnéticas pertenecientes a zonas bien localizadas del espectro.

La radiación solar llega a la Tierra como ondas electromagnéticas en forma de fotones, que no necesitan un medio físico para su propagación, y se desplazan por el espacio en todas las direcciones.

La cantidad de energía que transporta cualquier onda es proporcional a la *frecuencia*. La frecuencia es el número de veces que se repite una onda completa por unidad de tiempo. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la energía que la onda transporta, y por tanto, mayor el efecto cuando impacta sobre un cuerpo.

Otro parámetro característico de las radiaciones es la *longitud de onda*, se define como la distancia, medida en la dirección de propagación de la onda, entre dos puntos de ésta cuyo estado de movimiento es idéntico.

La longitud de onda, es inversamente proporcional a la frecuencia, por tanto, cuanto más pequeña sea la longitud de onda, más grande será la frecuencia es decir más veces se repite la onda en el tiempo, y por tanto, puede ser transportada mayor energía. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) de las ondas magnéticas se relacionan mediante la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2.1)$$

Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz, ($c = 300000\text{km/s}$).

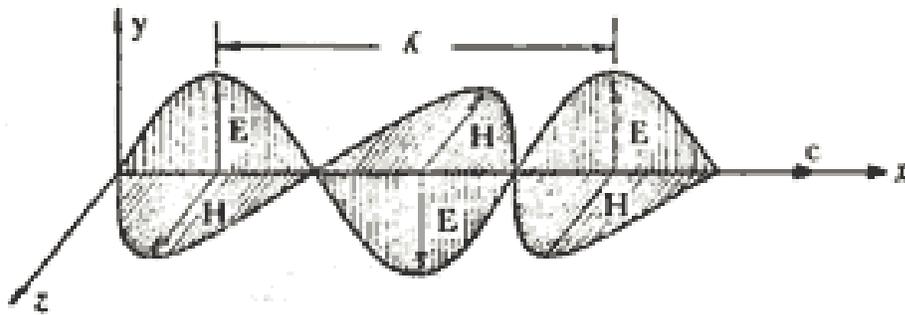


Figura 2.2.3 Onda electromagnética de longitud de onda λ y velocidad de propagación c (Velocidad de la luz), mostrando los vectores de campo eléctrico (E) y campo magnético (H).

El Sol, como emisor de radiación, emite en casi todas las frecuencias, desde las muy largas ondas hasta las de longitud de onda muy pequeña como los rayos gamma, producidos por reacciones nucleares en la atmosfera solar durante las ráfagas solares.

A continuación se da un listado de las diferentes regiones del espectro de radiación electromagnética solar de acuerdo a su longitud de onda:

Región	Longitud de onda
Radio	$\lambda \geq 1 \text{ mm}$
Infrarrojo lejano	$1 \text{ mm} > \lambda \geq 10 \text{ }\mu\text{m}$
Infrarrojo	$10 \text{ }\mu\text{m} > \lambda \geq 0.75 \text{ }\mu\text{m}$
Visible	$0.75 \text{ }\mu\text{m} > \lambda \geq 0.3 \text{ }\mu\text{m}$
Ultravioleta (UV)	$3000 \text{ \AA} > \lambda \geq 1200 \text{ \AA}$
Extremo ultravioleta (EUV)	$1200 \text{ \AA} > \lambda \geq 100 \text{ \AA}$
Rayos X suaves	$100 \text{ \AA} > \lambda \geq 1 \text{ \AA}$
Rayos X duros	$1 \text{ \AA} > \lambda$

Donde las unidades usadas están relacionadas de acuerdo a la siguiente igualdad:

$$1 \text{ m} = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \mu\text{m} = 10^{-9} \text{ nm} = 10^{-10} \text{ \AA}$$

Las radiaciones visible e infrarroja son usualmente consideradas como emisiones del Sol quieto, de ahí que hasta la fecha no hayan podido medirse con seguridad variaciones en esta región del espectro excepto por algunos cambios en ciertas líneas de Fraunhofer (estas líneas oscuras del espectro se originan en la parte superior de la atmosfera solar donde el gas está aún muy caliente pero mucho más frío que el del cuerpo de gas que se encuentra por abajo y es el que radia luz blanca.

Las líneas de Fraunhofer son, por lo tanto, líneas de absorción y no de emisión).

El flujo solar en la región del ultravioleta es importante por sus efectos en la alta atmosfera. Aunque esta banda contiene solo alrededor del 1% de la irradiación solar total, su energía es muy importante porque es completamente absorbida por el ozono y las moléculas de oxígeno diatómico en la alta atmosfera de la Tierra.

En función de la frecuencia, las radiaciones tienen más o menos capacidad de penetración en los materiales: mientras más corta sea la longitud de onda, más facilidad para hacerlo.

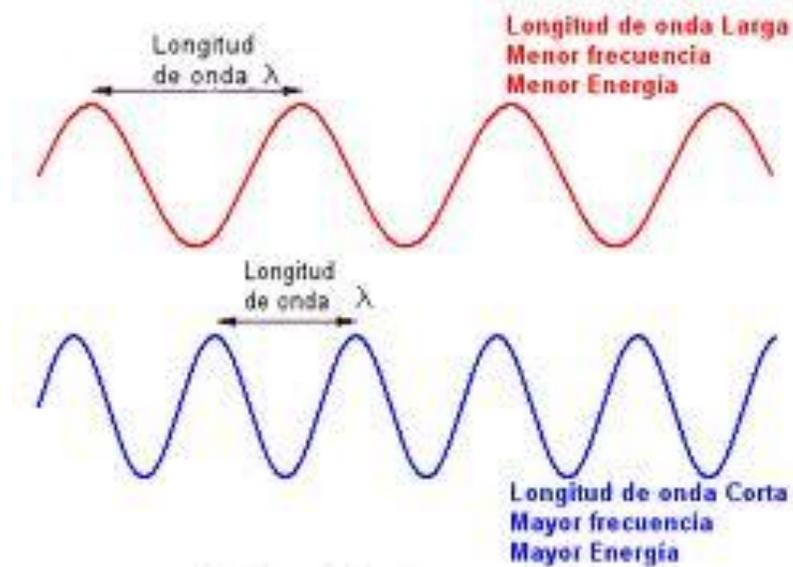


Figura 2.2.4 Longitud de onda.

Radiación de un cuerpo negro.

Cuerpo negro es el nombre que se le da a un objeto idealizado que es teóricamente un emisor perfecto de radiación. Un cuerpo así absorbe toda la radiación que llega a su superficie y no refleja nada; emite también de una forma característica, toda la energía que se le suministra; en otras palabras, es un buen absorbente, de igual manera es un buen emisor. Un cuerpo negro emite todo tipo de radiación, pero la cantidad de energía emitida a las longitudes de ondas distintas depende de su temperatura.

Radiación infrarroja.

Para longitudes de onda entre unos 750nm hasta justo menos de 1mm la radiación observada se origina en la fotosfera y baja cromosfera y sigue muy aproximadamente la curva de cuerpo negro para un cuerpo con una temperatura de 6000K a 4000K (las temperaturas más bajas corresponden a la radiación procedente de la región de temperatura mínima, a unos 500km por encima de la base de la fotosfera).

Radiación ultravioleta.

En el ultravioleta cercano (alrededor de los 300nm) la radiación se origina, igual que la luz visible, en la fotosfera, pero para longitudes de onda cada vez más cortas la fuente del continuo ultravioleta se corre hacia la cromosfera. Para longitudes de onda más cortas que unos 140nm la materia es suficientemente opaca a la radiación de los niveles más bajos que es posible ver rayas de emisión de la misma cromosfera.

Por lo tanto, por debajo de esta longitud de onda el espectro cambia de un continuo brillante con rayas de absorción oscuras a un continuo débil con rayas de emisión brillantes.

El estudio del Sol a las longitudes de onda de las rayas de emisión ultravioletas permite investigar capas cada vez más altas de la cromosfera y de la región de transición.

2.3 CONSTANTE SOLAR.

La radiación emitida por el Sol junto con sus condiciones geométricas respecto a la Tierra otorgan como resultado que, sobre la atmósfera terrestre, incida una cantidad de radiación casi constante. Esto ha dado lugar a la definición de la llamada constante solar.

La constante solar, G , es un flujo de energía proveniente del Sol, que incide instantáneamente sobre una superficie de área unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera para evitar la atenuación de la radiación causada por la diversidad de fenómenos físicos y químicos que se verifican en la atmósfera.

Está claro que la distancia desde la fuente de radiación hasta el plano en cuestión, influye fuertemente en el flujo de energía. Se sabe que la intensidad de la radiación solar es mucho mayor en Mercurio que en la Tierra, así mismo que en nuestro planeta es mucho mayor que en Plutón.

Como la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, por lo tanto, la distancia Tierra – Sol no es constante, así que se debe considerar un valor promedio, para poder hablar de una constante.

El valor comúnmente aceptado para G ha variado en los últimos años, según las técnicas de medición que se han empleado, lo cual no indica que haya variado en sí la magnitud de la energía que se recibe del Sol.

La disponibilidad de las grandes altitudes que nos brindan las naves espaciales han permitido mediciones directas de la radiación solar fuera de toda atmósfera terrestre. Estas mediciones fueron hechas con una variedad de instrumentos en nueve programas experimentales separados. Resultando en un valor de la constante solar de $G=1353 \text{ W/m}^2$ con un error estimado de $\pm 1.5\%$ este valor estándar fue aceptado por la NASA (1971) y por la ASTM.

2.4 RADIACIÓN SOLAR.

Es bien sabido que la radiación solar que llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas las cuales viajan a la velocidad de la luz, pero con diferentes longitudes de ondas, es la inagotable fuente de energía que alimenta el inmenso motor de la máquina atmosférica.

El movimiento del aire, su calentamiento, la evaporación del agua, las tormentas eléctricas, los ciclones, tornados, etc. Son fenómenos que no ocurrirían sin un consumo de energía.

Es por ello que si existe una posible conexión entre cambios en la actividad o variabilidad solar por un lado, y el tiempo y el clima terrestre por el otro lado.

La energía que llega a la parte alta de la atmosfera es una mezcla de radiaciones de longitudes de onda, formada por radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja, estas constituyen el espectro solar terrestre que podemos ver en la siguiente imagen.

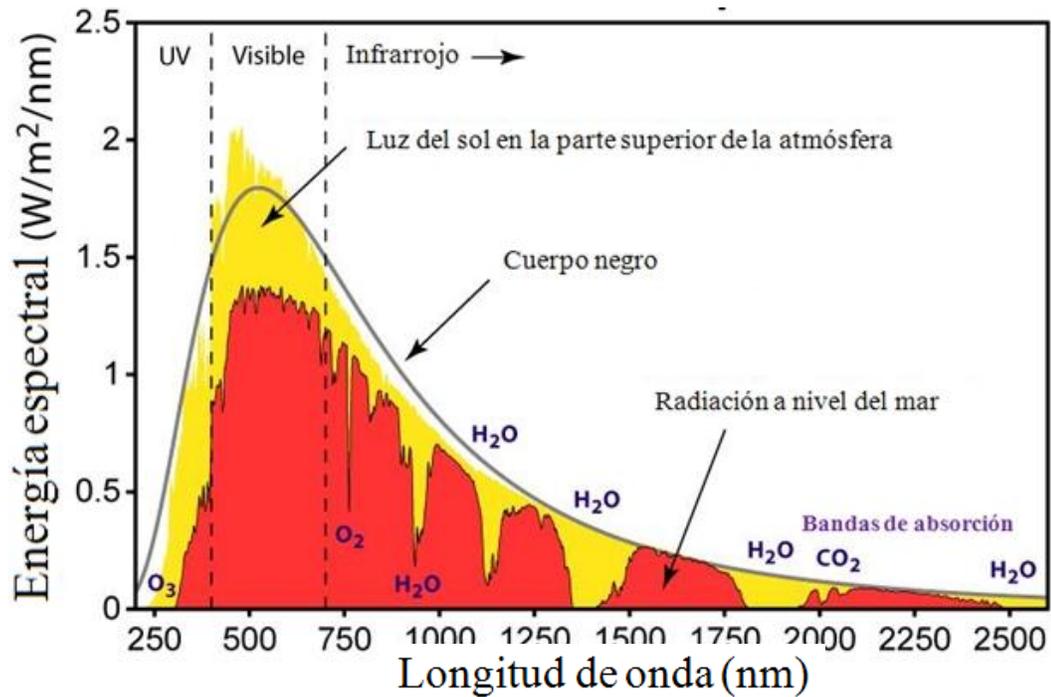


Figura 2.4.1 Radiación solar.

Radiación Solar directa, dispersa o difusa y total.

Según como llegue la luz solar a la superficie de la Tierra se puede clasificar la radiación en tres tipos diferentes: directa, dispersa o difusa y total.

La radiación solar directa es la que incide sobre cualquier superficie con un ángulo único y preciso. La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión.

Esto explica como un área con sombra o pieza sin luz solar esté iluminada: le llega luz difusa o radiación difusa.

Los gases de la atmósfera dispersan más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer.

Cuando amanece o anochece, la radiación solar recorre un mayor espesor de atmosfera y la luz azul y violeta es dispersada hacia el espacio exterior, pasando mayor cantidad de luz roja y naranja hacia la Tierra, lo que da el color del cielo a esas horas.

Las proporciones de radiación directa y dispersa recibida en una superficie dependen:

- De las condiciones meteorológicas: en un día nublado la radiación es prácticamente dispersa en su totalidad mientras que en un día despejado con clima seco predomina la componente directa, que puede llegar hasta el 90% de la radiación total.
- De la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal: una superficie horizontal recibe la máxima radiación dispersa (si no hay alrededor objetos a una altura superior a la de la superficie) y la mínima reflejada. Al aumentar la inclinación de la superficie de captación disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada.
- De la presencia de superficies reflectantes (debido a que las superficies claras son las más reflectantes, la radiación reflejada aumenta en invierno por efecto de la nieve y disminuye en verano por efecto de la absorción de la hierba o del terreno).

Para concretar, decir que la radiación total que incide sobre una superficie inclinada corresponde a la suma de las componentes de la radiación.

$$I_{\text{total}} = I_{\text{Directa}} + I_{\text{difusa}} \quad (2.4.1)$$

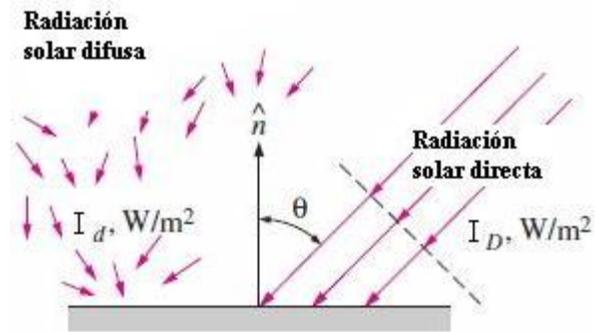


Figura 2.4.2 Radiación solar difusa y directa incidiendo sobre una superficie horizontal en la superficie de la Tierra.

Capítulo 3

TRAYECTORIAS TIERRA – SOL

3.1 LEYES DE KEPLER.

El astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) formuló las tres famosas leyes que llevan su nombre después de analizar un gran número de observaciones realizadas por Tycho Brahe (1546-1601) de los movimientos de los planetas, sobre todo de Marte.

Kepler haciendo cálculos sumamente largos, encontró que había discrepancias entre la trayectoria calculada para Marte y las observaciones de Tycho, diferencias que alcanzaban en ocasiones 8 minutos de arco (las observaciones de Tycho poseían una exactitud de alrededor de 2 minutos de arco). Estas diferencias lo llevaron a descubrir cuál era la verdadera órbita de Marte y los demás planetas del sistema solar.

1ª Ley – Órbitas elípticas.

Las órbitas de los planetas son elípticas que presentan una pequeña excentricidad y en donde el Sol se localiza en uno de sus focos.

Una elipse es básicamente un círculo ligeramente aplastado. Técnicamente se denomina elipse a una curva plana y cerrada en donde la suma de la distancia a los focos (puntos fijos F_1 y F_2) desde uno cualquiera de los puntos M que la forman es constante e igual a la longitud del eje mayor de la elipse (segmento AB).

El eje menor de la elipse es el segmento CD , es perpendicular al segmento AB y corta a este por el medio.

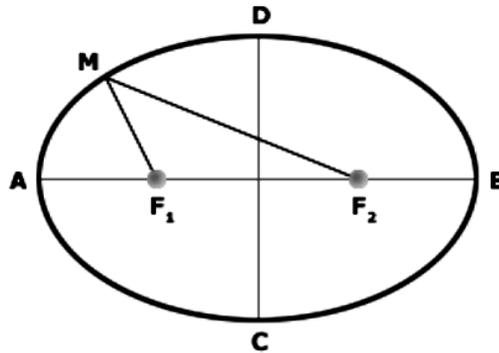


Figura3.1.1 Los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol.

La excentricidad de la elipse puede calcularse de la siguiente manera:

$$e = \frac{F_1F_2}{AB} \quad (3.1.1)$$

Donde e es la excentricidad, F_1F_2 es la distancia entre los focos y AB es el eje mayor de la elipse.

Las órbitas de los planetas son elípticas presentando una pequeña excentricidad. En el caso de la Tierra la excentricidad es de 0.017, el planeta de mayor excentricidad es Plutón con 0.248, y le sigue de cerca Mercurio con 0.206.

2ª Ley – Ley de las áreas.

Las áreas barridas por el radio vector que une a los planetas al centro del Sol son iguales a tiempos iguales.

La velocidad orbital de un planeta es variable, de forma inversa a la distancia al Sol: a mayor distancia la velocidad orbital será menor, análogamente a distancias menores la velocidad orbital será mayor.

La velocidad es máxima en el punto más cercano al Sol (perihelio) y mínima en su punto más lejano (afelio).

El radio vector de un planeta es la línea que une los centros del planeta y el Sol en un instante dado.

El área que describen en cierto intervalo de tiempo formado entre un primer radio vector y un segundo radio vector mientras el planeta se desplaza por su órbita es igual al área formada por otro par de radio vectores en igual intervalo de tiempo orbital.

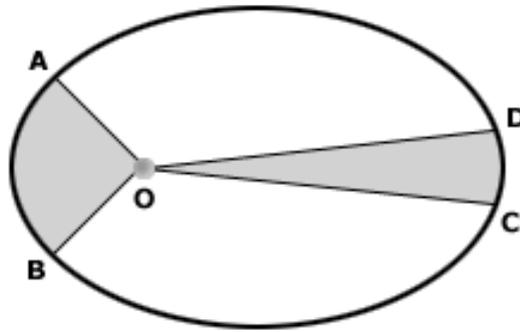


Figura 3.1.2 Las áreas barridas por el radio vector que une a los planetas al centro del Sol son iguales a tiempos iguales.

En la *figura 3.1.2* El tiempo que le toma al planeta recorrer del punto A al punto B de su órbita, es igual al tiempo que le toma para ir del punto C al D, por tanto las áreas marcadas OAB y OCD son iguales, para que esto suceda, el planeta debe desplazarse más rápidamente en las cercanías del Sol (en el foco de la elipse).

3ª Ley – Ley armónica.

Los cuadrados de los períodos orbitales sidéreos de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol.

El período sidéreo se mide desde el planeta y respecto de las estrellas: está referido al tiempo transcurrido de dos pasajes sucesivos del Sol por el meridiano de una estrella.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{d_1^3}{d_2^3} \quad (3.1.2)$$

Donde T_1 y T_2 son los períodos orbitales y d_1 y d_2 son las distancias a las cuales orbitan del cuerpo central. La fórmula es válida mientras las masas de los objetos sean despreciables en comparación con la del cuerpo central al cuál orbitan.

Para dos cuerpos con masas m_1 y m_2 y una masa central M puede usarse la siguiente fórmula:

$$\frac{T_1^2 (M + m_1)}{T_2^2 (M + m_2)} = \frac{d_1^3}{d_2^3} \quad (3.1.3)$$

Esta ley fue publicada en 1614 en la más importante obra de Kepler “HarmoniciMundi”, solucionando el problema de la determinación de las distancias de los planetas al Sol. Posteriormente Newton explicaría, con su ley de gravitación universal, las causas de esta relación entre el período y la distancia.

3.2 MOVIMIENTOS DE LA TIERRA.

La Tierra se encuentra en un sistema planetario y un entorno astronómico complejo por el que circula con movimientos aparentes lentos.

Los movimientos más representativos son el de rotación y traslación, ambos con repercusiones sobre los ecosistemas, el paisaje y la vida humana.

3.3 PERIHELIO Y AFELIO.

A medida que los planetas giran alrededor del Sol, estos se acercan y se alejan del Sol.

El lugar donde un planeta se encuentra más cercano al Sol se llama perihelio. El lugar donde un planeta se encuentra más lejos del Sol se llama afelio.

Las palabras “perihelio” y “afelio” provienen del griego. En griego “helios” significa Sol, “peri” significa cerca, y “apo” significa lejos.

3.4 DISTANCIA MEDIA TIERRA – SOL.

La Tierra al igual que el resto de los planetas y de acuerdo con la primera ley de Kepler, gira en torno al Sol describiendo una órbita elíptica con dicho astro situado en uno de sus focos.

El eje mayor de esta elipse se denomina línea de los ápsides, siendo sus extremos el perihelio, punto de la órbita terrestre más próxima al Sol, y el afelio, punto más alejado. El plano que contiene la órbita de la Tierra se denomina plano de la eclíptica.

La distancia media de la Tierra al Sol r_0 , define una unidad de medida llamada unidad astronómica, UA , cuyo valor es

$$r_0 = 1.495979 \times 10^8 \text{ Km} = 1UA$$
$$r_0 = 1.495979 \times 10^8 \text{ Km} \approx 150 \times 10^6 \text{ Km}$$

La excentricidad de la elipse, es decir, la razón entre la distancia del centro de la elipse a un foco y el semieje mayor, es igual aproximadamente a 0.017.

Al ser esta excentricidad tan pequeña la órbita terrestre podría asimilarse a una circunferencia de radio r_0 . No obstante, a lo largo del año, la distancia Tierra-Sol varía apreciablemente entre un valor mínimo de 0.983 UA en el paso por el perihelio (aproximadamente el 3 de enero), y un valor máximo de 1.017 UA en el paso por el afelio (aproximadamente el 4 de julio).

Estas variaciones originan una variación anual de un $\pm 3\%$ en la cantidad de radiación solar recibida por la Tierra.

El período orbital de la Tierra o el intervalo de tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos por el mismo punto de la órbita, define el denominado año sidéreo, y tiene una duración de 365.25636 días.

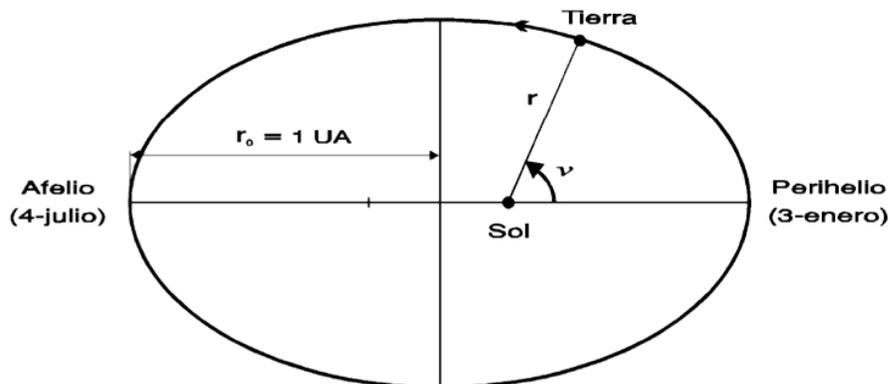


Figura 3.4.1 Distancia media Tierra – Sol.

3.5 MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN.

El movimiento orbital de la Tierra no es uniforme. La velocidad lineal media es de unos 29.8 Km/s , siendo máxima en el perihelio y mínima en el afelio. Este movimiento viene determinado por la segunda ley de Kepler o ley de las áreas, según la cual el radio vector que une el Sol con un planeta, barre áreas iguales en tiempos iguales esto es la velocidad areolar es constante.

A efectos prácticos interesa conocer la distancia Tierra-Sol en un día cualquiera del año. Las expresiones prácticas más usadas son las siguientes:

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \operatorname{sen} \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \operatorname{sen} 2\Gamma \quad (3.5.1)$$

o bien

$$E_0 = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2n\pi}{365} \right) \quad (3.5.2)$$

Donde:

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (3.5.3)$$

Siendo r la distancia Tierra-Sol en el día n del año a partir del 1 de Enero, r_0 la distancia Tierra-Sol igual a $1UA$

y

$$\Gamma = \left(\frac{2\pi(n-1)}{365} \right) \quad (3.5.4)$$

es el ángulo del día o ángulo diario en radianes.

Donde n corresponde al número del día juliano del año ($1 \leq n \leq 360$), variando desde 1 para el 1 de enero, hasta 365 para el 31 de diciembre.

3.6 MOVIMIENTO DE ROTACIÓN.

Simultáneamente al movimiento de traslación descrito, la Tierra gira sobre un eje que pasa por los polos, en un movimiento de rotación que puede suponerse perfectamente uniforme, el periodo de rotación de la Tierra, es decir, el tiempo que tarda en dar una vuelta completa sobre sí misma, es ligeramente inferior a un día,

exactamente 23h 53 min. 4.099 s. El plano normal al eje de rotación que pasaría por el centro de gravedad de la Tierra se denomina plano ecuatorial o plano del ecuador.

El eje de rotación de la Tierra no es perpendicular al plano de la eclíptica. Esto da origen a las estaciones del año – invierno, primavera, verano y otoño – y a la desigual duración de los días y de las noches.

Durante su movimiento de traslación alrededor del Sol, el eje de rotación de la Tierra se desplaza paralelamente a sí mismo, conservando prácticamente invariable su dirección en el espacio y formando siempre el mismo ángulo con la normal al plano de la eclíptica. Este ángulo se denomina oblicuidad de la eclíptica y su valor es de $23^{\circ} 27'$.

Esta oblicuidad permite definir sobre la órbita terrestre algunos puntos singulares. Para ello se ha de considerar un plano que pasando por el centro geométrico del Sol sea normal al eje de rotación de la Tierra. La intersección de este plano, paralelo al ecuador, con el plano de la eclíptica recibe el nombre de línea de los equinoccios y determina sobre la órbita terrestre los puntos conocidos como equinoccio de primavera y equinoccio de otoño.

Análogamente la perpendicular trazada en el plano de la eclíptica por el centro del Sol a la línea de los equinoccios se llama línea de los solsticios cuya intersección con la órbita terrestre da lugar a otros dos puntos denominados solsticio de invierno y solsticio de verano. El equinoccio de primavera, también denominado punto vernal, se utiliza frecuentemente en astronomía como punto de referencia, ya que su posición puede determinarse con gran precisión.

Cuando la Tierra está situada sobre los equinoccios, lo que ocurre aproximadamente los días 21 de marzo y 22 de septiembre, el Sol se encuentra sobre el plano del ecuador y, por consiguiente la duración del día natural de luz es igual a la de la noche en todos los lugares de la Tierra. Hacia el 21 de junio, fecha del solsticio de verano, el

Sol ilumina más directamente el hemisferio norte de la Tierra, donde el Sol alcanza su máxima inclinación respecto al plano del ecuador. Seis meses más tarde, hacia el 22 de diciembre fecha del solsticio de invierno, la situación anterior se ha invertido, siendo el hemisferio sur el más iluminado. En los solsticios la diferencia entre el día natural de luz y la noche es máxima.

En el solsticio de invierno, el hemisferio sur, está inclinado hacia el Sol, durante este período esta porción del planeta recibe una radiación mayor, por su proximidad al astro. Por el contrario en el hemisferio norte se encuentran en la estación invernal.

En el solsticio de verano el hemisferio sur recibe menos horas de asoleamiento, por lo tanto la radiación posee un ángulo menor, estando dicho hemisferio más alejado del Sol.

Durante los equinoccios de otoño y primavera, la radiación es constante para ambos hemisferios.

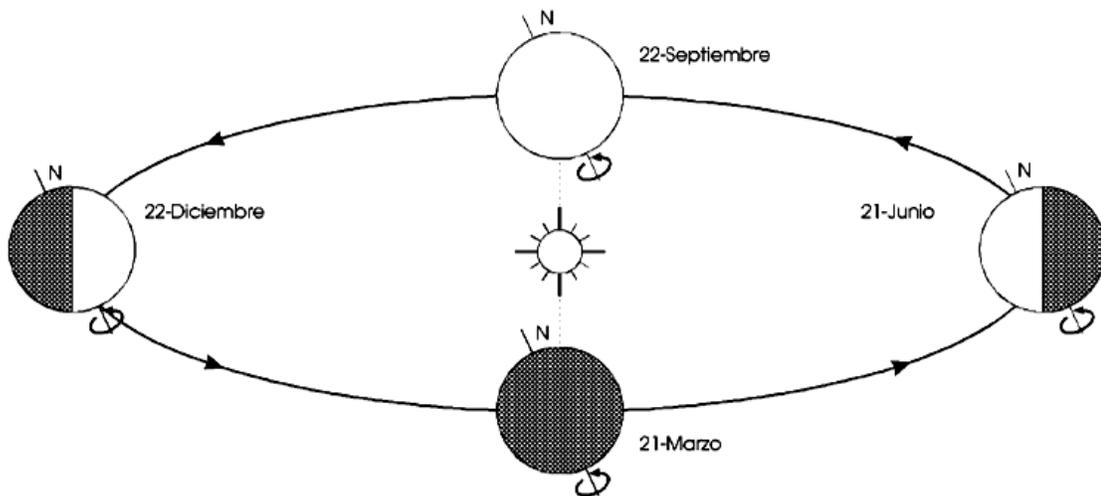


Figura3.6.1 Movimiento de la Tierra alrededor del Sol.

Esta rotación es la causa de la visibilidad o no (día, noche) del Sol desde un determinado lugar de la Tierra, y por tanto, proporciona la definición del tiempo solar en relación con la posición angular relativa observador-Sol.

3.7 LÍNEAS IMAGINARIAS DE LA TIERRA.

En las representaciones de la Tierra, como las esferas y los mapas, se traza una serie de líneas imaginarias que constituyen la llamada red de coordenadas geográficas, cuya finalidad es fijar la posición de los distintos puntos de la superficie terrestre.

Las principales líneas imaginarias son:

El eje. Es la línea imaginaria sobre la cual gira la Tierra. Los puntos de contacto de esta línea con la superficie terrestre son los polos. El eje está inclinado respecto al plano de la órbita que recorre la Tierra alrededor del Sol. Esta inclinación es de $23^{\circ}27'$.

Los meridianos. Son semicírculos máximos cuyos extremos coinciden con los polos. Se representan en los mapas mediante líneas verticales.

Los paralelos. Son círculos perpendiculares al eje de la Tierra y paralelos entre sí. Estos círculos van disminuyendo en su diámetro hasta que se convierten en un punto en los polos donde la latitud es de 90° . Se representan en los mapas mediante líneas horizontales. El Ecuador es el paralelo máximo, que divide la Tierra en dos partes iguales hemisferio norte y hemisferio sur.

Los trópicos son paralelos situados a $23^{\circ}27'$ del Ecuador. El del hemisferio norte se llama Trópico de Cáncer y el del hemisferio sur Trópico de capricornio.

Los círculos polares son paralelos situados a $23^{\circ}27'$ de los polos. El del hemisferio norte se llama Círculo Polar Ártico y el del hemisferio sur recibe el nombre de Círculo Polar Antártico.

3.8 PUNTOS CARDINALES DE LA TIERRA Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS.

Cada día el Sol aparece por un punto del horizonte y se oculta por el punto opuesto. El lugar por donde aparece el Sol se denomina Este, Levante u Oriente, y el lugar por donde se oculta, Oeste, Poniente u Occidente.

Si trazamos una línea recta que una el Este y el Oeste y una perpendicular a ella, los extremos de esta perpendicular señalarán el Norte y el Sur.

Norte (N), Sur (S), Este (E) y Oeste (O) son los puntos cardinales que tomamos como referencia para orientarnos.

Además de los puntos citados, existen otros puntos intermedios;

- Noroeste (NO) entre el Norte y el Oeste.
- Noreste (NE) entre el Norte y el Este.
- Suroeste (SO) entre el Sur y el Oeste.
- Sureste (SE) entre Sur y el Este.

El conjunto de los puntos cardinales y sus intermedios forman la rosa de los vientos.

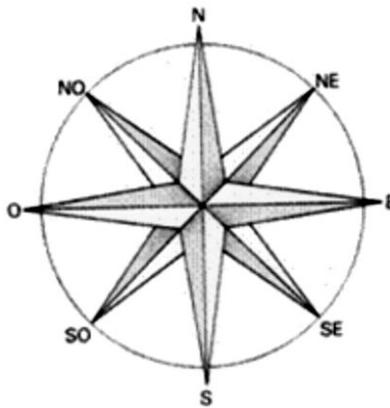


Figura3.8.1 Rosa de los vientos.

Coordenadas Geográficas.

Para poder localizar cualquier punto sobre la superficie terrestre, se ha trazado una serie de líneas imaginarias que constituyen la llamada red geográfica, formada por meridianos y paralelos.

A efectos prácticos se puede tomar la Tierra como una esfera cuyo plano perpendicular al eje determina una circunferencia llamada Ecuador terrestre.

Los planos que pasan por los polos, y que por consiguiente, son normales al plano del Ecuador, se denominan planos meridianos y determinan sobre la esfera terrestre unas circunferencias conocidas como meridianos terrestres. Finalmente los planos paralelos al Ecuador cortan a la esfera terrestre formando circunferencias denominadas paralelos.

El número de meridianos terrestres es infinito, sin embargo, en los mapas suelen representarse 360, correspondientes a los 360° que poseen las esferas.

Se ha tomado como meridiano origen, es decir, como meridiano 0° , al que pasa por Greenwich (observatorio próximo a Londres). Los 360 meridianos se distribuyen en dos grupos de 180, uno al Este y otro al Oeste del meridiano 0° .

El número de paralelos es también infinito, aunque en las representaciones cartográficas se acostumbra señalar 90 en el hemisferio norte y otros 90 en el hemisferio sur, tomando como paralelo 0° a la línea del Ecuador.

El sistema empleado para localizar un punto sobre la superficie terrestre consiste en medir las distancias que separan a ese punto del meridiano y del paralelo que se toman como origen. A estas dos distancias se les llama coordenadas geográficas y son la longitud y la latitud.

Longitud.

La longitud, ϕ , de un lugar es la distancia expresada en grados, desde dicho lugar al meridiano 0° o de Greenwich, es decir, la longitud es el ángulo descrito entre dos líneas que parten del centro del círculo que pasa por el Ecuador, que van hacia un punto de la superficie que se ha acordado como referencia (el meridiano de Greenwich) y hacia el punto deseado.

Estos ángulos se miden entre 0 y 180° hacia el Este y entre 0 y -180° hacia el Oeste. Un lugar tiene longitud Este o longitud Oeste según se encuentre al Este o al Oeste del meridiano 0° .

Latitud.

La latitud, λ , de un lugar es la distancia expresada en grados, desde dicho lugar al paralelo 0° . Estos ángulos se miden hacia el polo norte ($+90^\circ$) de modo que hacia el polo sur son negativos (-90°). Obviamente el ecuador es latitud 0° . Un lugar tiene latitud norte o latitud sur, según se encuentre en el hemisferio norte o hemisferio sur.

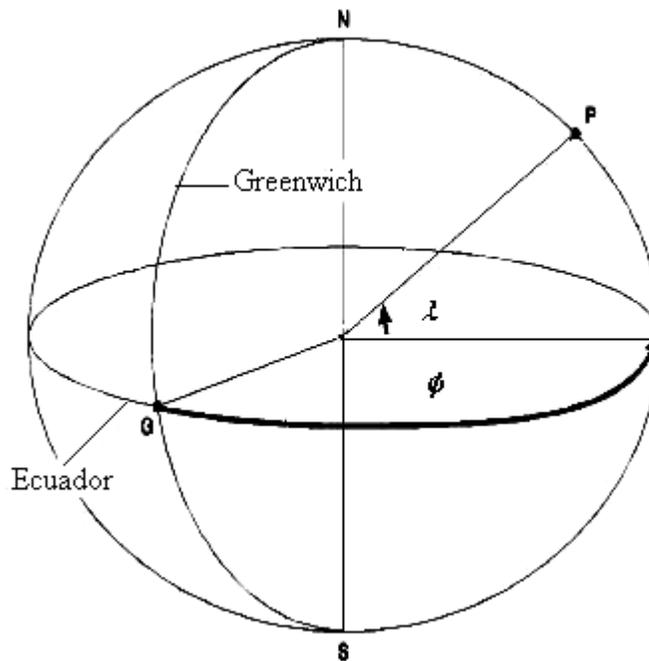


Figura3.8.2 Coordenadas geográficas de la Tierra.

Capítulo 4

ECUACIÓN DEL TIEMPO

4.1 DEFINICIÓN DE LA ECUACIÓN DEL TIEMPO.

En los cálculos de energía solar, el tiempo solar debe ser usado para expresar la hora del día. El tiempo solar está basado en el movimiento angular aparente del Sol a través del cielo. En el momento en que el Sol cruza el meridiano del observador es el medio día solar local.

Esto generalmente no coincide con las 12:00 en el reloj de una comunidad. Para convertir el tiempo local estándar a tiempo solar se deben hacer dos correcciones: La ecuación del tiempo y la corrección de longitud.

Debido a los factores asociados a la órbita de la Tierra alrededor del Sol, la velocidad orbital de la Tierra varía durante todo el año. Así que el tiempo solar también varía ligeramente del tiempo dado por un reloj que avanza a un ritmo uniforme. A esta diferencia se le llama *la ecuación del tiempo*.

La ecuación del tiempo surge porque la duración de un día, es decir, el tiempo requerido por la Tierra para realizar una revolución completa sobre su propio eje con respecto al Sol, no es uniforme durante todo el año.

Durante el año el promedio que dura de un día es 24h, sin embargo la duración de un día varía debido a la excentricidad de la órbita terrestre y a la declinación del eje de la Tierra con respecto al plano normal de su órbita. Debido a la forma elíptica de su órbita, la Tierra está más cercana al Sol el 3 de enero, y más lejos del Sol el 4 de julio.

Por tanto la velocidad de giro de la Tierra es más rápida que su velocidad promedio a mitad del año (Octubre a Marzo) y más lenta que su velocidad promedio para la restante mitad del año. (Abril a Septiembre).

Los valores de la ecuación del tiempo como una función del día del año (N) puede ser obtenida aproximadamente de las siguientes ecuaciones:

$$ET = 9.87 \operatorname{sen}(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \operatorname{sen}(B) \quad [\text{min}] \quad (4.1.1)$$

y

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (4.1.2)$$

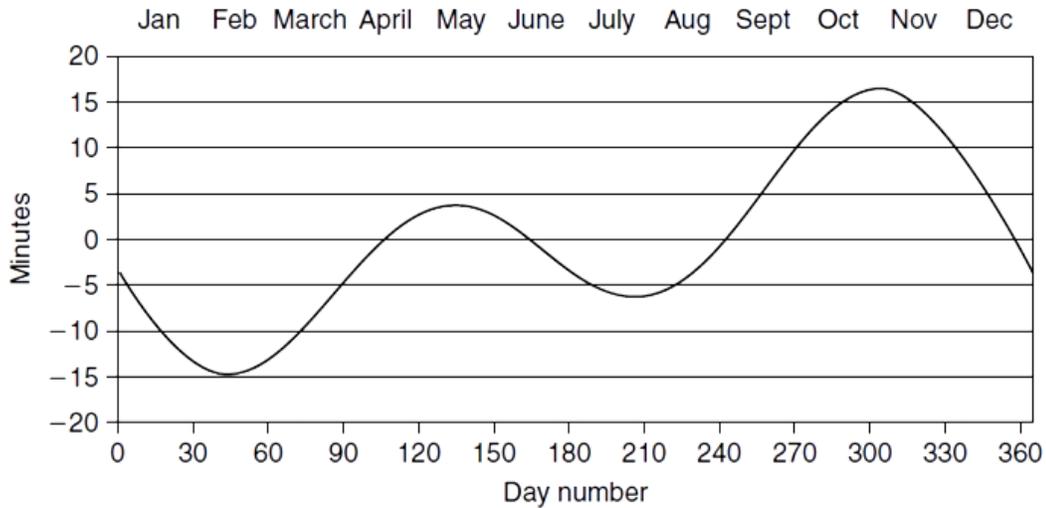


Figura 4.1.1 Una representación gráfica de la ecuación anterior, donde la ecuación del tiempo puede ser obtenida directamente.

Corrección de longitud.

El tiempo estándar del reloj o tiempo local es calculado con respecto a un meridiano seleccionado como central, de un huso horario o del meridiano estándar, éste es el meridiano de Greenwich, el cual está a una longitud de 0° .

El Sol toma 4 minutos en recorrer (transversalmente) un grado de longitud, la corrección por longitud expresa la diferencia entre los meridianos locales y estándar esta es: $4(\text{longitud estándar} - \text{longitud local})$.

Debe ser añadido o restado al tiempo local. Esta longitud es constante para una longitud particular y la siguiente fórmula debe de aplicarse teniendo en cuenta los signos.

Si la ubicación está al Este del meridiano estándar, la corrección debe ser añadida al tiempo del reloj.

Si la ubicación esta al Oeste debe ser restado. La ecuación general para calcular el tiempo solar es:

$$AST = LST + ET \mp 4(SL - LL) - DS \quad (4.1.3)$$

Donde:

AST = Tiempo solar aparente

LST = Tiempo estandar local

ET = Ecuación del tiempo

SL = Longitud estandar

LL = Longitud local

DS = Cambio de horario.

(Es 0 o 60 minutos)

Si la ubicación es al Este de Greenwich el signo en la ecuación será menos (-), y si es al Oeste el signo es más (+). Si un cambio de horario es usado, este debe ser restado del tiempo local. Este término generalmente es ignorado y solo es considerado si el cálculo se realiza dentro de este periodo.

4.2 ÁNGULOS SOLARES BÁSICOS Y DERIVADOS.

La posición relativa del Sol en el firmamento respecto a un punto de la superficie terrestre se puede definir en términos de ángulos. Estos ángulos son los siguientes:

Declinación.

El eje de la Tierra siempre está inclinado un ángulo de 23.45° del eje de la eclíptica, que es normal al plano de la eclíptica. Cuando la Tierra gira alrededor del Sol es como si el eje polar se moviera respecto al Sol.

La declinación solar es la distancia angular de los rayos del Sol al Norte (o Sur) del Ecuador, la declinación al Norte se designa como positiva. Como se muestra es el ángulo entre la línea central Tierra-Sol y la proyección de esta línea sobre el plano ecuatorial.

La declinación es función de la fecha, siendo máxima en el solsticio de verano ($\delta = +23.45^\circ$ el 21 de junio), nula en los equinoccios ($\delta = 0^\circ$ el 21 de marzo y el 22 de septiembre aproximadamente) y mínima en el solsticio de invierno ($\delta = -23.45^\circ$ el 22 de diciembre).

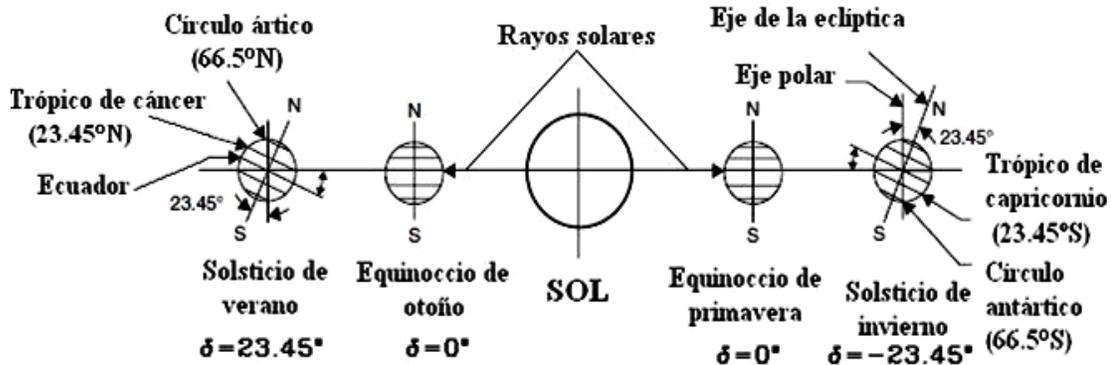


Figura 4.2.1 Variación anual de la declinación solar.

La declinación se puede calcular analíticamente para cualquier día del año con suficiente precisión considerando que es una función sinusoidal por medio de la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (4.2.1)$$

La declinación también puede ser obtenida en radianes, mediante la fórmula de Spencer.

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos(\Gamma) + 0.070257 \sin(\Gamma) \\ & - 0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) \\ & - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma) \end{aligned} \quad (4.2.2)$$

Donde Γ es llamado ángulo diario, dado (en radianes) por:

$$\Gamma = \left(\frac{2\pi(N-1)}{365} \right) \quad (4.2.3)$$

La declinación solar durante cualquier día dado puede ser considerada como constante para cálculos en ingeniería.

Mes	Numero de día	Día promedio del mes		
		Día del año	N	δ (grados)
Enero	i	17	17	-20.92
Febrero	31+i	16	47	-12.95
Marzo	59+i	16	75	-2.42
Abril	90+i	15	105	9.41
Mayo	120+i	15	135	18.79
Junio	151+i	11	162	23.09
Julio	181+i	17	198	21.18
Agosto	212+i	16	228	13.45
Septiembre	243+i	15	258	2.22
Octubre	273+i	15	288	-9.60
Noviembre	304+i	14	318	-18.91
Diciembre	344+i	10	344	-23.05

Figura 4.2.2 Número de día y día medio recomendado para cada mes.

Ángulo horario.

Ángulo de hora solar h : Es el desplazamiento angular Este u Oeste del Sol con respecto al meridiano local debido a la rotación de la Tierra en su eje a 15° por hora. Se toma como referencia ($h=0$) el mediodía. En la mañana este ángulo es negativo y en la tarde positivo. Expresado simbólicamente, el ángulo horario en grados es:

$$h = \pm 0.25(\text{Número de minutos del medio día solar local})$$

Donde el signo más es aplicable a las horas de la tarde y el signo menos a las horas de la mañana. El ángulo horario también puede ser obtenido del tiempo solar aparente (AST), el tiempo solar local corregido es:

$$h = (\text{AST} - 12)15 \quad (4.2.4)$$

Al medio día solar local $\text{AST} = 12$ y $h = 0$. Por lo tanto de la ecuación 2.3, el tiempo estándar local (el tiempo indicado por nuestros relojes al mediodía solar local) es:

$$\text{LST} = 12 - \text{ET} \pm 4(\text{SL} - \text{LL}) \quad (4.2.5)$$

Ángulo de altitud solar, α .

El ángulo de altitud solar es el ángulo entre los rayos del Sol y un plano horizontal, como se observa en la figura, está relacionado con el ángulo de cenit solar ϕ , que es el ángulo entre los rayos del Sol y la vertical. Por lo tanto:

$$\phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

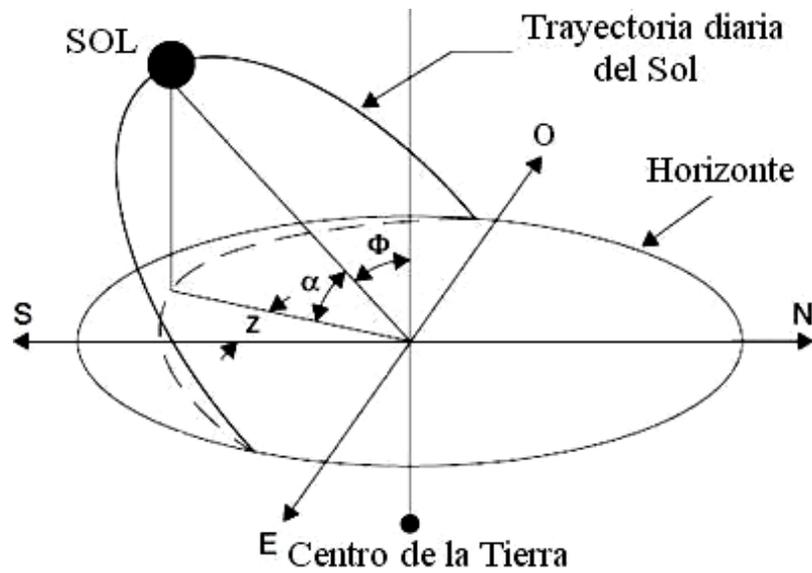


Figura 4.2.3 Movimiento aparente diario del Sol del amanecer al anochecer.

La expresión matemática para el ángulo de altitud solar es:

$$\text{sen}(\alpha) = \cos(\phi) = \text{sen}(L)\text{sen}(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (4.2.6)$$

Donde:

L = latitud local, definido como el ángulo entre una línea del centro de la Tierra al sitio de interés y el plano ecuatorial. Valores al Norte del ecuador son positivos y negativos hacia el Sur.

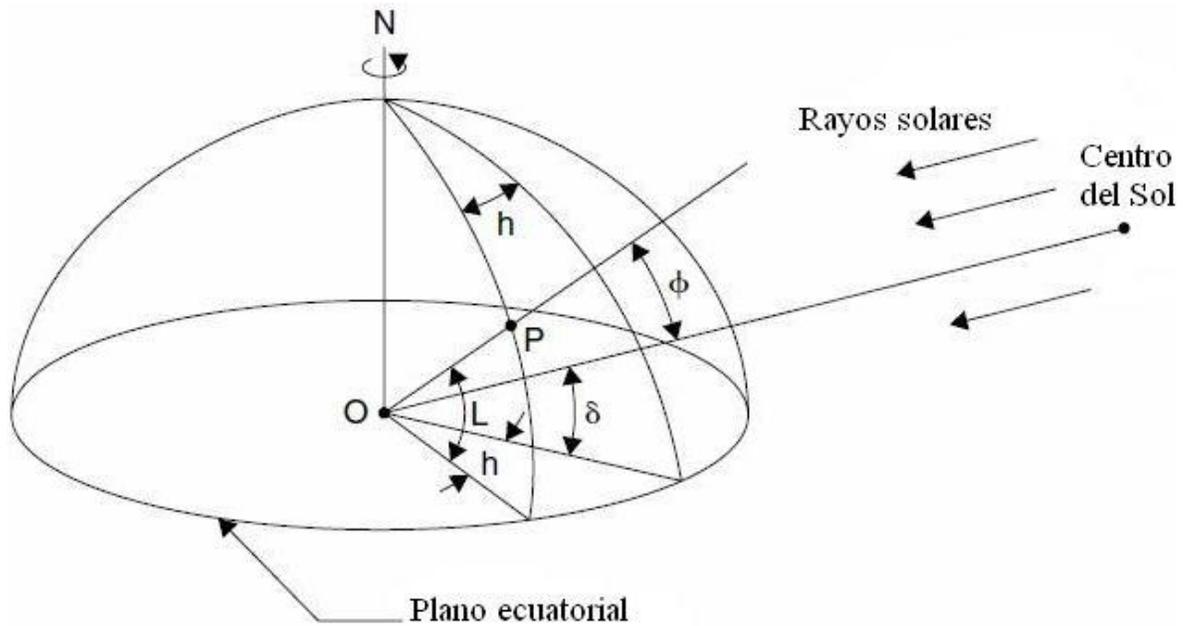


Figura 4.2.4 Definición de latitud, ángulo horario y declinación solar.

Ángulo de azimut del Sol, Z .

Es el ángulo formado por la proyección en el plano horizontal del rayo solar. Este ángulo tiene valor cero cuando la proyección apunta al Norte, valor positivo cuando apunta hacia el Oeste y valor negativo cuando apunta al Este. $-180 \leq z \leq 180^\circ$. La expresión matemática para el ángulo solar azimut es:

$$\text{sen}(Z) = \frac{\cos(\delta) \text{sen}(h)}{\cos(\alpha)} \quad (4.2.7)$$

Ángulo cenit, ϕ : Es el ángulo subtendido entre la línea cenit y la línea de vista del Sol.

Inclinación β : Es el ángulo entre la superficie de interés y el plano horizontal.
 $0 \leq \beta \leq 180^\circ$

Ángulo de azimut de la superficie, Z_s : Es el ángulo de desviación de la proyección en el plano horizontal de la normal a la superficie con respecto al meridiano local. Este ángulo tiene valor cero cuando la proyección apunta al Norte, valor positivo cuando apunta hacia el Oeste y valor negativo cuando apunta al Este. $-180 \leq \gamma \leq 180^\circ$.

Ángulo de incidencia (θ): Es el ángulo entre el haz de radiación directa en una superficie y la normal a esa superficie.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(L)\text{sen}(\delta)\cos(\beta) - \cos(L)\text{sen}(\delta)\text{sen}(\beta)\cos(Z_s) \\ & + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)\cos(\beta) + \text{sen}(L)\cos(\delta)\cos(h)\text{sen}(\beta)\cos(Z_s) \\ & + \cos(\delta)\text{sen}(h)\text{sen}(\beta)\text{sen}(Z_s) \end{aligned} \quad (4.2.8)$$

Esta es la ecuación general para el ángulo de incidencia sobre una superficie para cualquier orientación. Sin embargo puede ser reducida a formas mucho más simples para casos específicos.

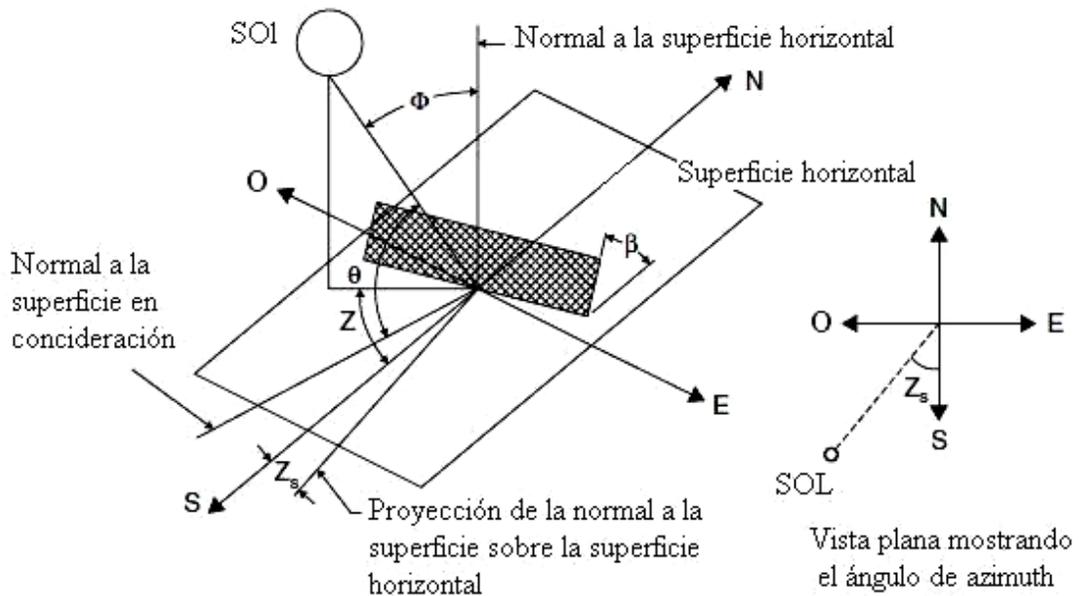


Figura 4.2.5 Diagrama de ángulos solares.

- Para superficies horizontales, $\beta = 0$ y $\theta = \phi$, y la ecuación se reduce a la forma de la altura solar:

$$\cos(\phi) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (4.2.9)$$

- Para superficies verticales, $\beta = 0$, y la ecuación viene a ser:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & -\cos(L)\sin(\delta)\cos(Z_s) + \sin(L)\cos(\delta)\cos(h)\cos(Z_s) \\ & + \cos(\delta)\sin(h)\sin(Z_s) \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

- Para una superficie orientada hacia el Sur en el hemisferio norte $Z_s = 0$, y la ecuación se reduce a:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(L)\sin(\delta)\cos(\beta) - \cos(L)\sin(\delta)\sin(\beta) \\ & + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)\cos(\beta) \\ & + \sin(L)\cos(\beta)\cos(h)\sin(\beta) \end{aligned} \quad (4.2.11)$$

La cuál puede ser reducida a:

$$\cos(\theta) = \sin(L - \beta)\sin(\delta) + \cos(L - \beta)\cos(\delta)\cos(h) \quad (4.2.12)$$

- Para una superficie orientada hacia el Norte en el hemisferio sur, $Z_s = 180$ y la ecuación se reduce a:

$$\cos(\theta) = \sin(L + \beta)\sin(\delta) + \cos(L + \beta)\cos(\delta)\cos(h) \quad (4.2.13)$$

4.3 ÁNGULOS HORARIOS PARA LA SALIDA Y PUESTA DEL SOL Y LA DURACIÓN DEL DÍA.

Se dice que el Sol sale y se pone cuando el ángulo de altitud solar es cero, así que el ángulo horario al amanecer, h_{ss} , puede ser calculado mediante la ecuación de la altitud solar, haciendo $\alpha = 0$.

$$\text{sen}(\alpha) = \text{sen}(0) = 0 = \text{sen}(L)\text{sen}(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h_{ss}) \quad (4.3.1)$$

o

$$\cos(h_{ss}) = -\frac{\text{sen}(L)\text{sen}(\delta)}{\cos(L)\cos(\delta)} \quad (4.3.2)$$

La cuál se reduce a:

$$\cos(h_{ss}) = -\tan(L)\tan(\delta) \quad (4.3.3)$$

Donde h_{ss} es tomado como positivo al amanecer.

Debido a que el ángulo horario al mediodía solar local es 0° , con cada 15° de latitud equivalente a 1h, el tiempo para el amanecer y el anochecer en horas del mediodía solar local es:

$$H_{ss} = -H_{sr} = \frac{1}{15 \cos^{-1}[-\tan(L)\tan(\delta)]} \quad (4.3.4)$$

La duración del día es dos veces el tiempo del anochecer, ya que el mediodía solar está en medio del amanecer y el anochecer. Por lo tanto la duración del día en horas es:

$$\text{Duración del día} = \frac{2}{15 \cos^{-1}[-\tan(L)\tan(\delta)]} \quad (4.3.5)$$

Capítulo 5

PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

5.1 CONDUCCIÓN.

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas.

La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos y gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio.

En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres. Por ejemplo llegará el momento en que una bebida enlatada fría en un cuarto cálido se caliente hasta la temperatura ambiente como resultado de la transferencia de calor por conducción, del cuarto hacia la bebida, a través del aluminio.

La velocidad de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material del que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. Se sabe que al envolver un tanque de agua caliente con fibra de vidrio (un material aislante) se reduce la velocidad de la pérdida de calor de ese tanque.

Entre más grueso sea el aislamiento, menor será la pérdida de calor.

También se conoce que un tanque de agua caliente perderá calor a mayor velocidad cuando se baja la temperatura del cuarto en donde se aloja.

Además, entre más grande sea el tanque, mayor será el área superficial y, por consiguiente, la velocidad de la pérdida de calor.

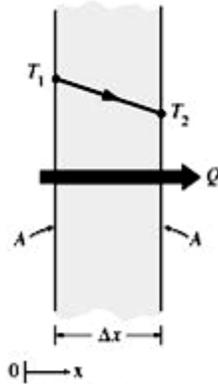


Figura 5.1.1 Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana de espesor $\Delta x = L$ y área A , como se muestra en la figura. La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$. Los experimentos han demostrado que la velocidad de transferencia de calor, Q se duplica cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de la transferencia de calor, pero se reduce a la mitad cuando se duplica el espesor L de la pared.

Por tanto, se concluye que la velocidad de la conducción de calor a través de una placa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa; es decir:

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (5.1.1)$$

En donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. En el caso límite $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación anterior se reduce a la forma diferencial:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (5.1.2)$$

la cuál se llama **ley de Fourier de la conducción de calor**, en honor de J. Fourier, quien la expresó por primera vez en su texto sobre transferencia de calor en 1822. Aquí dT/dx es el gradiente de temperatura, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama T - x (la razón de cambio de T con respecto a x), en la ubicación x . La relación antes dada indica que la velocidad de conducción del calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección.

El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x . El signo negativo en la ecuación anterior garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva. El área A de transferencia de calor siempre es normal (o perpendicular) a la dirección de esa transferencia.

Conductividad térmica.

Los diferentes tipos de materiales almacenan calor en forma diferente, se define la propiedad de calor específico C_p como una medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica, por ejemplo $C_p = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ para el agua y $C_p = 0.45 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ para el hierro, a temperatura ambiente, indica que el agua puede almacenar casi 10 veces más energía que el hierro por unidad de masa, del mismo modo la conductividad térmica k es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, por ejemplo $k = 0.608 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ para el agua y $k = 80.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ para el hierro, a temperatura ambiente, indica que el hierro conduce el calor más de 100

veces más rápido que el agua. Por tanto, se dice que el agua es mala conductora del calor en relación con el hierro, aún cuando el agua es un medio excelente para almacenar energía térmica.

La ecuación para la velocidad de conducción en la transferencia de calor, en condiciones estacionarias (ley de Fourier), también se puede concebir como la ecuación de definición para la conductividad térmica. Por tanto, la conductividad térmica de un material se puede definir como *la velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura*. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un *aislante*.

Las conductividades térmicas de los gases como el aire varían en un factor de 10^4 con respecto de los metales puros como el cobre. Los cristales y los metales puros tienen las conductividades térmicas más elevadas, y los gases y los materiales aislantes, las más bajas. Las conductividades térmicas de los líquidos suelen encontrarse entre las de los sólidos y las de los gases, normalmente la conductividad térmica de una sustancia alcanza su valor máximo en la fase sólida y el mínimo en la fase gaseosa. Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura.

La variación de la conductividad térmica sobre ciertos rangos de temperatura es despreciable para algunos materiales, pero significativa para otros. Las conductividades térmicas de algunos sólidos exhiben incrementos sorprendentes a temperaturas cercanas al cero absoluto, cuando estos sólidos se convierten en superconductores. Por ejemplo la conductividad del cobre alcanza un valor máximo de alrededor de $k = 20\,000 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ a 20K, la cual es alrededor de 50 veces mayor a la correspondiente a temperatura ambiente.

Difusividad térmica.

El producto ρC_p que se encuentra con frecuencia en el análisis de transferencia de calor, se llama capacidad calorífica de un material. Tanto el calor específico C_p como la capacidad calorífica ρC_p representan la capacidad de almacenamiento de calor de un material. Pero C_p la representa por unidad de masa, en tanto que ρC_p la representa por unidad de volumen como se puede apreciar a partir de sus unidades $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ y $\text{J/m}^3\cdot^\circ\text{C}$ respectivamente.

Otra propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio es la difusividad térmica. La cual representa cuán rápido se difunde el calor a través de un material y se define como:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (5.1.3)$$

La conductividad térmica k representa lo bien que un material puede conducir el calor y la capacidad calorífica ρC_p representa cuanta energía almacena un material por unidad de volumen. Por tanto, la difusividad térmica de un material se puede concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. Es obvio que un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene gran difusividad térmica. Entre mayor sea la difusividad térmica más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica, significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido principalmente por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido aún más lejos.

La transferencia de calor tiene dirección así como magnitud. La velocidad de la conducción de calor en una dirección específica es proporcional al gradiente de temperatura, el cuál es el cambio en la temperatura por unidad de longitud.

En general la conducción en un medio es tridimensional y depende del tiempo. Es decir $T = (x, y, z, t)$ y la temperatura en un medio varía con la posición así como con el tiempo.

Se dice que la conducción del calor en un medio es estable cuando la temperatura no varía con el tiempo, y es no estable o transitoria cuando si varía. Se dice que la conducción del calor en un medio es unidimensional cuando la conducción se realiza significativamente en una sola dirección y es despreciable en las otras dos dimensiones, bidimensional cuando la conducción en la tercera dimensión es despreciable y tridimensional cuando la conducción en todas las dimensiones es significativa. La fuerza impulsora para cualquier forma de transferencia de calor es la diferencia de temperatura, y entre mayor sea esa diferencia, mayor es la velocidad de la transferencia.

Con el fin de obtener una relación general para la ley de Fourier de la conducción de calor, se considera un medio en que la distribución de temperatura es tridimensional. En la figura se muestra una superficie isotérmica en ese medio.

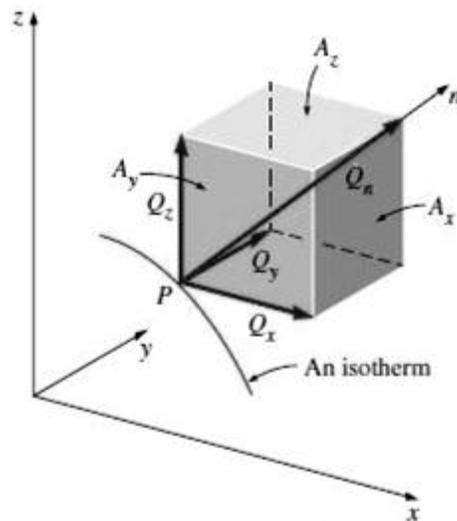


Figura 5.1.2 El vector transferencia de calor siempre es normal a una superficie isotérmica y se puede descomponer en sus componentes como cualquier otro vector.

El vector de flujo de calor en un punto P sobre esa superficie debe ser perpendicular a ella y debe apuntar en la dirección de la temperatura decreciente. Si n es la normal a la superficie isotérmica en el punto P , la velocidad de la conducción de calor en ese punto se puede expresar por la ley de Fourier como:

$$Q_n = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{W}) \quad (5.1.4)$$

En coordenadas rectangulares el vector conducción de calor se puede expresar en términos de sus componentes como:

$$\vec{Q} = Q_x \vec{i} + Q_y \vec{j} + Q_z \vec{k} \quad (5.1.5)$$

en donde \vec{i} , \vec{j} y \vec{k} son vectores unitarios y Q_x , Q_y y Q_z son las magnitudes de las velocidades de transferencia de calor en las direcciones x , y y z , las cuales una vez más se pueden determinar a partir de la ley de Fourier como:

$$Q_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Q_y = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \text{y} \quad Q_z = -kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5.1.6)$$

Aquí A_x , A_y y A_z son áreas de conducción de calor normales a las direcciones x , y y z respectivamente.

Conducción de calor en estado estable en placas planas.

La velocidad de la conducción de calor a través de una pared plana es proporcional a la conductividad térmica promedio, al área de la pared y a la diferencia de temperatura, pero es inversamente proporcional al espesor de la pared. Asimismo una vez que se cuenta con la velocidad de la conducción de calor, se puede determinar la temperatura $T(x)$ en cualquier ubicación x al remplazar T_2 por T y L por x .

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (\text{W}) \quad (5.1.7)$$

Esta ecuación se puede reacomodar para obtener:

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{pared}}} \quad (\text{W}) \quad (5.1.8)$$

donde

$$R_{\text{pared}} = \frac{L}{kA} \quad (^\circ\text{C/W}) \quad (5.1.9)$$

es la resistencia térmica de la pared en contra de la conducción de calor o simplemente la resistencia a la conducción de la pared. Note que la resistencia térmica de un medio depende de la configuración geométrica y de las propiedades térmicas del medio.

La ecuación antes dada para el flujo de calor es análoga a la relación para el flujo de corriente eléctrica I expresada como:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_e} \quad (5.1.10)$$

donde R_e es la resistencia eléctrica y $V_1 - V_2$ es la diferencia de voltaje a través de la resistencia. Por tanto la velocidad de transferencia de calor a través de una capa corresponde a la corriente eléctrica, la resistencia térmica a la resistencia eléctrica y la diferencia de temperatura a la diferencia de voltaje a través de la capa.

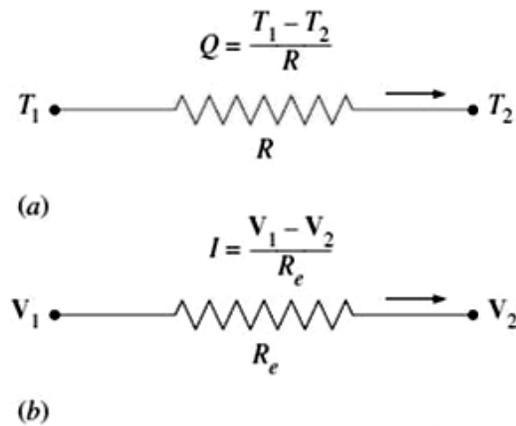


Figura 5.1.3 Analogía entre los conceptos de corriente (a) térmica y (b) eléctrica.

Red de resistencias térmicas.

Se considera ahora un flujo unidimensional en estado estacionario a través de una pared plana de espesor L área A y conductividad térmica k que está expuesta a la convección sobre ambos lados hacia fluidos a las temperaturas $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$, con coeficientes de transferencia de calor h_1 y h_2 , respectivamente. Si se supone que $T_{\infty 2} < T_{\infty 1}$, la variación de la temperatura será como se muestra en la figura. La temperatura varía en forma lineal en la pared y tiende asintóticamente a $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$ en los fluidos, a medida que se aleja de la pared.

En condiciones estacionarias se tiene:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{hacia la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de la} \\ \text{conducción de calor} \\ \text{a través de la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{velocidad de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{desde la pared} \end{array} \right)$$

o sea:

$$Q = h_1 A (T_{\infty 1} - T_1) = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = h_2 A (T_2 - T_{\infty 2}) \quad (5.1.11)$$

la cual se puede reacomodar como:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{1/h_1 A} = \frac{T_1 - T_2}{L/kA} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{1/h_2 A} \quad (5.1.12)$$

$$= \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{\text{conv}, 1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{pared}}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{R_{\text{conv}, 2}}$$

Al sumar los numeradores y denominadores da:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}} \quad (\text{W}) \quad (5.1.13)$$

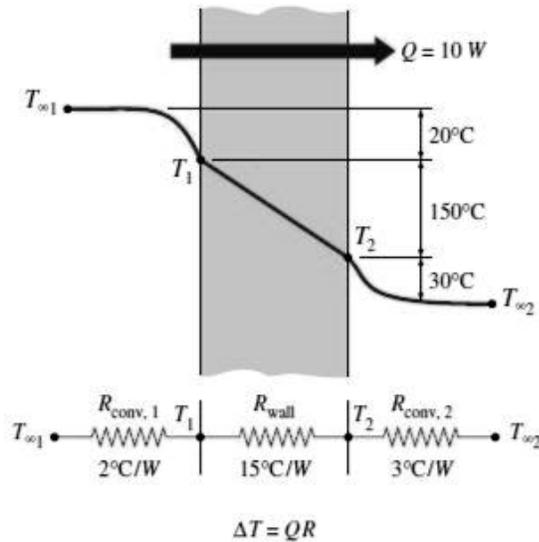


Figura 5.1.4 La caída de temperatura a través de una placa es proporcional a su resistencia térmica

El área de transferencia de calor es constante para una pared plana y la velocidad de esa transferencia a través de una pared que separa dos medios es igual a la diferencia de temperatura dividida entre la resistencia térmica total entre los medios. Las resistencias térmicas están en serie y la resistencia térmica equivalente se determina simplemente al sumar cada una de las resistencias, precisamente como en las resistencias eléctricas conectadas en serie. Se resume esto al expresar:

La rapidez de transferencia de calor estacionaria entre dos superficies es igual a la diferencia de temperatura dividida entre la resistencia térmica total entre esas dos superficies.

La razón de la caída de temperatura con respecto a la resistencia térmica a través de cualquier capa es proporcional a la resistencia térmica de ésta. Entre mayor sea la resistencia, mayor es la caída de temperatura. De hecho la ecuación $Q = \Delta T / R$ se puede reacomodar para obtener:

$$\Delta T = QR \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.1.14)$$

la cual indica que la caída de temperatura a través de cualquier capa es igual a la velocidad de transferencia de calor multiplicada por la resistencia térmica a través de esa capa. A veces resulta conveniente expresar la transferencia de calor a través de un medio de una manera análoga a la ley de Newton del enfriamiento como:

$$Q = UA \Delta T \quad (\text{W}) \quad (5.1.15)$$

Donde U es el coeficiente de transferencia de calor total. La comparación de las ecuaciones

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}} = UA \Delta T$$

revela que:

$$UA = \frac{1}{R_{\text{total}}} \quad (5.1.16)$$

Por lo tanto para la unidad de área, el coeficiente de transferencia de calor total es igual al inverso de la resistencia térmica total.

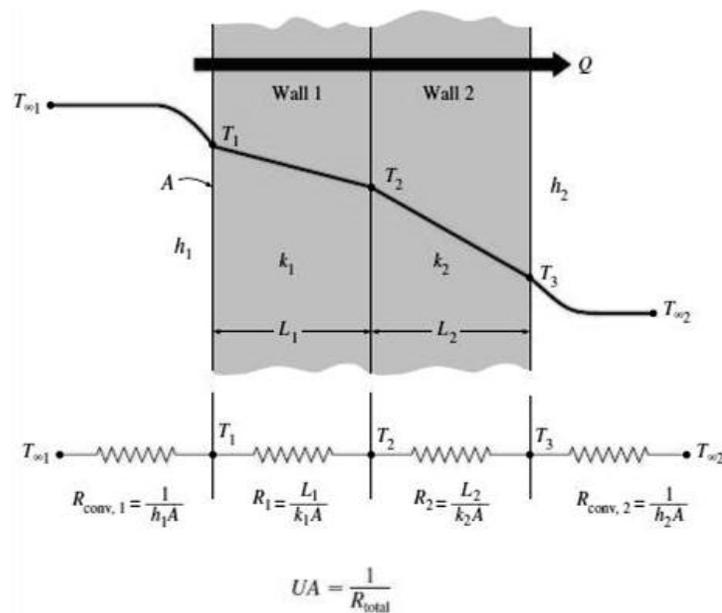


Figura 5.1.5 Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared plana de dos capas sujeta a convección sobre ambos lados.

Paredes planas de capas múltiples.

En la práctica a menudo se encuentran paredes planas que constan de varias capas de materiales diferentes. Todavía se puede usar el concepto de resistencia térmica con el fin de determinar la velocidad de la transferencia de calor estable a través de esas paredes compuestas.

Esto se logra simplemente al darse cuenta de que la resistencia a la conducción de cada pared L/kA conectada en serie y aplicando la analogía eléctrica. Es decir, al dividir la diferencia de temperatura que existe entre las dos superficies a las temperaturas conocidas entre la resistencia térmica total que presentan ambas.

Considere una pared plana que consta de dos capas (como un muro de ladrillo con una capa de aislamiento). La velocidad de la transferencia de calor estacionaria a través de esta pared compuesta por dos capas se puede expresar por la ecuación (5.1.13) como:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}}$$

donde R_{total} es la resistencia térmica total, expresada como:

$$\begin{aligned} R_{\text{total}} &= R_{\text{conv1}} + R_{\text{pared1}} + R_{\text{pared2}} + R_{\text{conv2}} \\ &= \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A} \end{aligned} \quad (5.1.17)$$

Los subíndices 1 y 2 en las relaciones R_{pared} indican la primera y la segunda capa, respectivamente.

También se pudo obtener este resultado al seguir el procedimiento utilizado para el caso de una sola capa, al notar que la velocidad de transferencia de calor estacionaria, Q , a través de un medio de capas múltiples es constante y, por consiguiente, debe ser la misma a través de cada una de las capas. Note, a partir de la red de resistencias térmicas, que dichas resistencias están en serie y, por tanto, la resistencia térmica total es simplemente la suma aritmética de cada una de las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria del flujo de calor.

Este resultado para el caso de dos capas es análogo al de una sola capa, excepto en que se suma una resistencia adicional por la capa adicional. Este resultado se puede extender para paredes planas que constan de tres o más capas, al sumar una resistencia adicional por cada capa adicional.

Una vez que se conoce Q , se puede determinar una temperatura superficial desconocida T_j en cualquier superficie o interfase j a partir de:

$$Q = \frac{T_i - T_j}{R_{\text{total}, i-j}} \quad (5.1.18)$$

donde T_i es la temperatura conocida en el lugar i y $R_{\text{total}, i-j}$ es la resistencia térmica total entre los lugares i y j . Por ejemplo cuando se dispone de las temperaturas de los fluidos $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$, para el caso de dos capas y se calcula Q , se puede determinar la temperatura T_2 en la interfase entre las dos paredes, a partir de:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{R_{\text{conv}, 1} + R_{\text{pared}, 1}} = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A}} \quad (5.1.19)$$

Redes generalizadas de resistencias térmicas.

También se puede usar el concepto de resistencia térmica o la analogía eléctrica para resolver problemas de transferencia de calor en estado estable que comprenden capas en paralelo o disposiciones combinadas serie-paralelo. Aun cuando este tipo de problemas con frecuencia son bidimensionales o incluso tridimensionales, se pueden obtener soluciones aproximadas suponiendo transferencia unidimensional de calor y utilizando la red de resistencias térmicas.

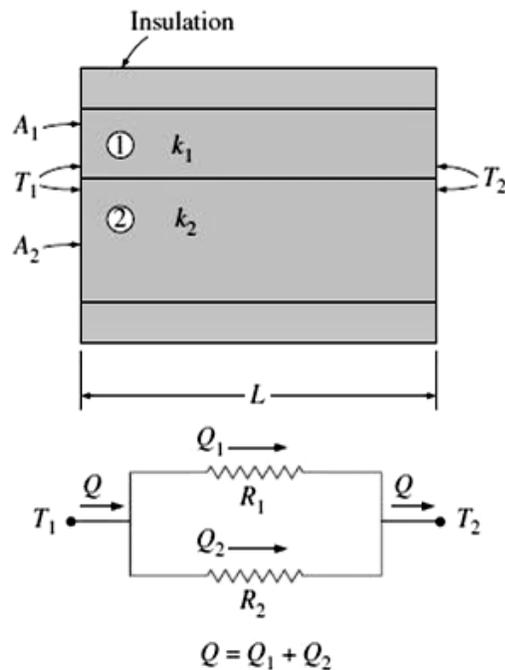


Figura 5.1.6 Red de resistencias térmicas para dos capas paralelas.

Considere una pared compuesta la cual consta de dos capas paralelas. La red de resistencias térmicas, que consta de dos resistencias en paralelo, se puede representar como se muestra en la figura.

Puesto que la transferencia total de calor es la suma de las transferencias a través de cada capa, se tiene

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_1} + \frac{T_1 - T_2}{R_2} = (T_1 - T_2) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5.1.20)$$

Si se utiliza la analogía eléctrica se tiene

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{total}}} \quad (5.1.21)$$

donde

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \longrightarrow R_{\text{total}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.1.22)$$

ya que las resistencias están en paralelo.

Considere ahora la disposición combinada serie-paralelo que se muestra a continuación. Una vez más, la velocidad total de transferencia de calor a través de este sistema compuesto se puede expresar como

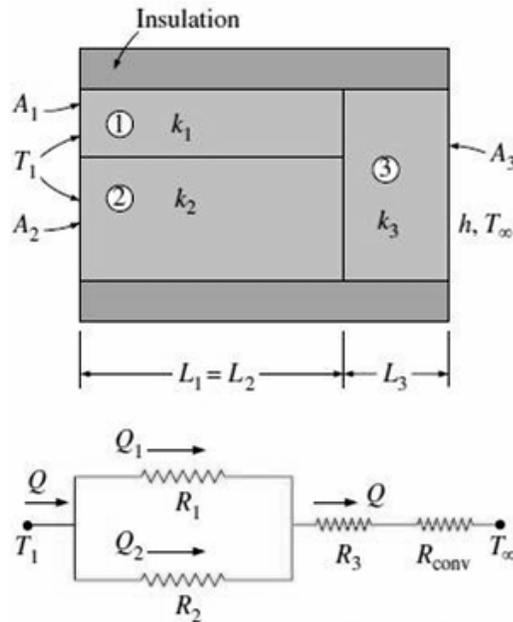


Figura 5.1.7 Red de resistencias térmicas para una disposición combinada serie-paralelo.

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{\text{total}}}$$

donde

$$R_{\text{total}} = R_{12} + R_3 + R_{\text{conv}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 + R_{\text{conv}} \quad (5.1.23)$$

y

$$R_1 = \frac{L_1}{k_1 A_1}, \quad R_2 = \frac{L_2}{k_2 A_2}, \quad R_3 = \frac{L_3}{k_3 A_3}, \quad R_{\text{conv}} = \frac{1}{h A_3} \quad (5.1.24)$$

Conducción del calor en cilindros y esferas.

Considere la conducción estable de calor a través de un tubo de agua caliente. El calor se pierde en forma continua hacia el exterior a través de la pared del tubo e, intuitivamente, se siente que la transferencia de calor a través de éste se efectúa en la dirección normal a su superficie y no se tiene alguna transferencia significativa en otras direcciones.

La pared del tubo, cuyo espesor es más bien pequeño, separa dos fluidos a temperaturas diferentes y, en consecuencia, el gradiente de temperatura en la dirección radial será relativamente grande. Además, si las temperaturas de los fluidos, dentro y fuera del tubo, permanecen constantes, entonces la transferencia de calor a través de ese tubo es estacionaria. Por tanto, la transferencia de calor a través del tubo se puede considerar estacionaria y unidimensional.

En este caso, la temperatura del tubo dependerá solo de una dirección (la dirección r radial) y se puede expresar como $T = T(r)$. La temperatura es independiente del ángulo azimutal o de la distancia axial. Esta situación se presenta aproximadamente en la práctica en los tubos cilíndricos largos y en los recipientes esféricos.

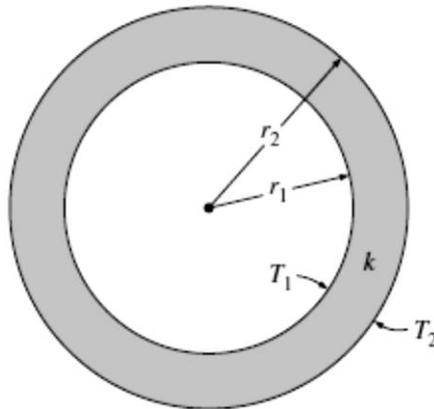


Figura 5.1.8 Tubo cilíndrico largo (o casco esférico) con temperaturas de las superficies interior y exterior especificadas.

En operación estable no se tiene cambio en la temperatura del tubo con el tiempo en cualquier punto. Por lo tanto, la velocidad de transferencia de calor hacia el tubo debe ser igual a la velocidad de transferencia hacia fuera de él. En otras palabras, la transferencia de calor a través del tubo debe ser constante $Q_{\text{cond, cil}} = \text{constante}$.

Considere una capa cilíndrica larga (como un tubo circular) de radio interior r_1 , radio exterior r_2 , longitud L y conductividad térmica promedio k las dos superficies de la capa cilíndrica se mantiene a temperaturas constantes T_1 y T_2 .

No hay generación de calor en la capa y la conductividad térmica es constante. Para una conducción de calor unidimensional a través de la capa cilíndrica, se tiene $T(r)$. Entonces la ley de Fourier de la conducción del calor para la transferencia de calor a través de la capa cilíndrica se puede expresar como

$$Q_{\text{cond, cil}} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (\text{W}) \quad (5.1.25)$$

en donde $A = 2\pi rL$ es el área de transferencia en la ubicación r . Note que A depende de r y, en consecuencia, varía en la dirección de la transferencia de calor. Al separar las variables de la ecuación antes dada e integrar desde $r = r_1$, en donde $T(r_1) = T_1$, hasta $r = r_2$, en donde $T(r_2) = T_2$, da

$$\int_{r=r_1}^{r_2} \frac{Q_{\text{cond, cil}}}{A} dr = - \int_{T=T_1}^{T_2} k dT \quad (5.1.26)$$

al sustituir $A = 2\pi rL$ y realizar la integración da

$$Q_{\text{cond, cil}} = 2\pi rL \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (\text{W}) \quad (5.1.27)$$

dado que $Q_{\text{cond, cil}} = \text{constante}$. esta ecuación se puede reacomodar para que quede

$$Q_{\text{cond, cil}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{cil}}} \quad (\text{W}) \quad (5.1.28)$$

donde

$$R_{\text{cil}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} = \frac{\ln(\text{radio exterior}/\text{radio interior})}{2\pi \times (\text{Longitud}) \times (\text{Conductividad térmica})} \quad (5.1.29)$$

es la resistencia térmica de la capa cilíndrica contra la conducción de calor o, simplemente, la resistencia a la conducción de la capa cilíndrica.

Se puede repetir el análisis antes dado para una capa esférica, al tomar $A = 4\pi r^2$ y realizar la integración. El resultado se puede expresar como

$$Q_{\text{cond, esf}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{esf}}} \quad (\text{W}) \quad (5.1.30)$$

donde

$$R_{\text{esf}} = \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k} = \frac{\text{Radio exterior} - \text{Radio interior}}{4\pi (\text{Radio exterior})(\text{Radio interior})(\text{Conductividad térmica})} \quad (5.1.31)$$

es la resistencia térmica de la capa esférica contra la conducción de calor o, simplemente, la resistencia a la conducción de la capa esférica.

Considere ahora el flujo unidimensional de calor en estado estacionario a través de una capa cilíndrica o esférica que está expuesta a la convección en ambos lados hacia fluidos que están a las temperaturas $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$, con coeficientes de transferencia de calor h_1 y h_2 , respectivamente. En este caso la red de resistencias térmicas consta de una resistencia a la conducción y dos a la convección, en serie, precisamente como aquella para la pared plana y la velocidad de transferencia de calor en condiciones estacionarias se puede expresar por la ecuación (5.1.13) como:

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}}$$

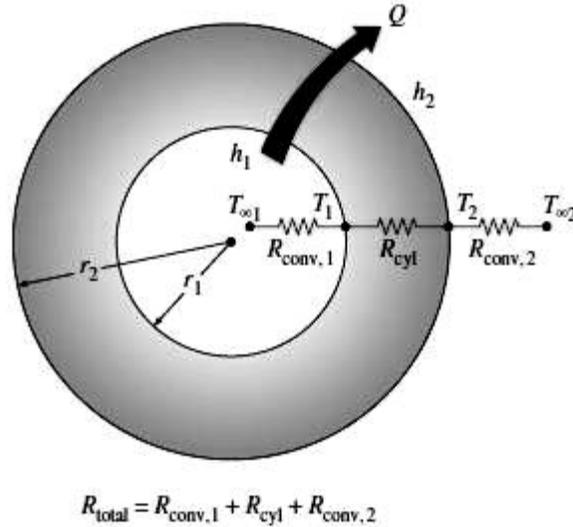


Figura 5.1.9 Red de resistencias térmicas para un casco cilíndrico (o esférico) sujeto a convección tanto en el lado interior como en el exterior.

donde

$$\begin{aligned} R_{\text{total}} &= R_{\text{conv},1} + R_{\text{cil}} + R_{\text{conv},2} \\ &= \frac{1}{(2\pi r_1 L) h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} + \frac{1}{(2\pi r_2 L) h_2} \end{aligned} \quad (5.1.32)$$

para una capa cilíndrica y

$$\begin{aligned} R_{\text{total}} &= R_{\text{conv},1} + R_{\text{cil}} + R_{\text{conv},2} \\ &= \frac{1}{(4\pi r_1^2) h_1} + \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k} + \frac{1}{(4\pi r_2^2) h_2} \end{aligned} \quad (5.1.33)$$

para una capa esférica. Note que A en la relación de la resistencia a la convección $R_{\text{conv}} = 1/hA$ es el área superficial en la cual ocurre la convección. Ésta es igual a $A = 2\pi rL$ para la superficie cilíndrica y $A = 4\pi r^2$ para una superficie esférica de radio r .

Note también que las resistencias térmicas están en serie, y por lo tanto, la resistencia térmica total se obtiene simplemente al sumar cada una de las resistencias.

Cilindros y esferas con capas múltiples.

La transferencia de calor estacionaria a través de cascos cilíndricos o esféricos de varias capas se puede manejar como en las paredes planas de capas múltiples, simplemente al sumar una resistencia adicional en serie por cada capa adicional. Por ejemplo la velocidad de la transferencia de calor estacionaria a través de un cilindro compuesto de tres capas, de longitud L , con convección en ambos lados, se puede expresar como

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}}$$

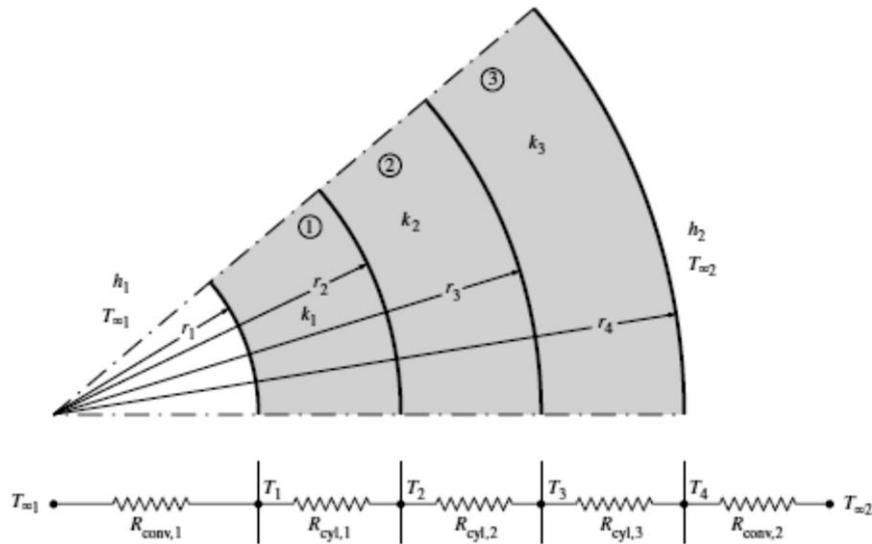


Figura 5.1.10 Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de un cilindro compuesto de tres capas sujeto a convección en ambos lados.

en donde

$$\begin{aligned} R_{\text{total}} &= R_{\text{conv},1} + R_{\text{cil},1} + R_{\text{cil},2} + R_{\text{cil},3} + R_{\text{conv},2} \\ &= \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_3} + \frac{1}{h_2 A_4} \end{aligned} \quad (5.1.34)$$

donde $A_1 = 2\pi r_1 L$ y $A_4 = 2\pi r_4 L$. Esta ecuación también se puede usar para una cubierta esférica de tres capas, al remplazar las resistencias térmicas de las capas cilíndricas por las correspondientes esféricas.

Una vez que se conoce Q se puede determinar cualquier temperatura intermedia T_j , al aplicar la relación $Q = (T_i - T_j) / R_{\text{total}, i-j}$ a través de cualquier capa o cualesquiera capas, en tal forma que T_i sea una temperatura conocida en la ubicación i y $R_{\text{total}, i-j}$ sea la resistencia térmica total entre las ubicaciones i y j . por ejemplo una vez que se ha calculado Q se puede determinar la temperatura T_2 en la interface entre la primera y la segunda capas cilíndricas a partir de

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{R_{\text{conv}, 1} + R_{\text{cil}, 1}} = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{\frac{1}{h_1(2\pi r_1 L)} + \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi L k_1}} \quad (5.1.35)$$

También se puede calcular T_2 a partir de

$$Q = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{R_2 + R_3 + R_{\text{conv}, 2}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{\frac{\ln(r_3 / r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{\ln(r_4 / r_3)}{2\pi L k_3} + \frac{1}{h_o(2\pi r_4 L)}} \quad (5.1.36)$$

También se puede utilizar el concepto de resistencia térmica para otras configuraciones geométricas, siempre que se usen las resistencias apropiadas a la conducción y las áreas superficiales apropiadas en las resistencias a la convección.

5.2 CONVECCION.

La convección es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla.

En los líquidos y en los gases el calor se propaga, las moléculas calientes de un líquido o de un gas tienen tendencia a elevarse, mientras que las moléculas frías tienden a descender. Así, se forman unas corrientes, llamadas de convección que ayudan a transportar el calor.

La convección tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o un gas. Debido a que no solo depende de una diferencia de temperaturas si no que es indispensable además el movimiento de un fluido.

Se trata en realidad de la combinación de varias etapas primeramente las partículas de fluido en inmediato contacto con la superficie sólida aumentando o disminuyendo su energía (dependiendo de cuál de los dos cuerpos tenga mayor temperatura) mediante el mecanismo de conducción de calor, debido a la comunicación de las moléculas de ambas sustancias en dicha superficie que las separa; posteriormente estos elementos de fluido con su energía interna modificada, se mueven hacia regiones con temperatura diferente y dejará su lugar a otras partículas que a su vez tomarán o cederán energía en la superficie sólida.

Finalmente, las partículas de fluido, al llegar a regiones de diferente temperatura se mezclan con otros elementos allí existentes o bien, ante la presencia de otra superficie sólida, se transfieren parte de su energía por conducción como se hizo con el primer sólido.

En el estudio de los fenómenos de convección de calor son más difícil que el de conducción y esto se atribuye a los factores que intervienen en el movimiento del fluido, tomando aspectos como la velocidad del fluido, rugosidad de la superficie y la capacidad de mezclado del grado de escurrimiento (Depende del flujo laminar o turbulento).

Generalmente se clasifica a la Transmisión de calor por convección en dos tipos de acuerdo a la forma de inducir el flujo: aquella denominada *convección forzada* y la que se conoce como *convección libre o natural*.

Convección forzada: En este caso el movimiento del fluido es causado por algún agente externo como podría ser una bomba o un ventilador.

Convección natural o libre: El movimiento del fluido es causado por la diferencia de densidades en el fluido, asociado por un gradiente de temperaturas.

La convección también se clasifica como externa e interna, dependiendo de si se obliga a fluir sobre una superficie o en un canal.

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, se acostumbra caracterizar el estudio de los problemas de convección de manera global en el enfriamiento de una pared bañada por un fluido en movimiento a una temperatura menor utilizando la siguiente expresión:

$$Q = hA(T_0 - T_f) \text{ (W)} \quad (5.2.1)$$

Generalmente conocida como *ley de Newton del enfriamiento*, ya que Newton planteó las bases para dicha expresión al estudiar experimentalmente el enfriamiento de los cuerpos en un intento por proponer una escala de temperaturas basada en este efecto.

Donde Q es el flujo de calor perpendicular al segmento de superficie. A es el área superficial de transferencia de calor (m^2); T_0 y T_f , respectivamente, son las temperaturas de la pared y el fluido a una distancia suficientemente alejada de ella ($^{\circ}C$); y h es un *coeficiente de transmisión de calor por convección* (W/m^2).

A juzgar por sus unidades se puede definir como la velocidad de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura, por lo tanto depende de las propiedades del fluido tales como la densidad, la viscosidad, la conductividad térmica, velocidad y régimen de escurrimiento.

Mecanismo de transporte de energía y flujo de fluidos.

La transferencia de calor entre la frontera de un sólido y un fluido, tiene lugar por la combinación de conducción y transporte de masa. Si la frontera está a una temperatura mayor que la del fluido, el calor fluye primero por conducción desde el sólido a las partículas del fluido en la vecindad de la pared.

De ésta manera, la energía transmitida incrementa la energía interna del fluido y el movimiento del fluido la lleva consigo. Cuando las partículas calientes del fluido alcanzan una región de temperatura menor, el calor se transfiere otra vez por conducción desde el fluido más caliente al más frío.

Como el modo de transferencia de energía por convección ésta íntimamente ligada al movimiento del fluido, es importante tener conocimiento acerca del mecanismo de flujo de fluidos. Uno de los aspectos más importantes en el análisis hidrodinámico es el establecer cuando es laminar o turbulento el movimiento de los fluidos.

En un flujo laminar o sin remolinos, el fluido se mueve en capas y cada partícula del fluido sigue una trayectoria uniforme y continua.

Las partículas del fluido en cada capa conservan una secuencia sin pasar de una a otra.

En un flujo turbulento las partículas de fluido se mueven de una manera desordenada e irregular, mezclándose unas con otras e intercambiando cantidades relativamente grandes de momento y de energía.

Para la mejor comprensión del mecanismo de transferencia de calor por convección es importante ver algunos conceptos que se utilizarán más adelante.

La viscosidad juega un papel muy importante en los procesos de los fluidos, es el parámetro del fluido que controla el transporte de la cantidad de movimiento, es decir, determina la relación entre el esfuerzo o tensión local en un fluido en movimiento con la velocidad con la que se produce la deformación del fluido, a lo que se denomina proceso de fluir.

Para los flujos ordenados en los cuales las partículas se mueven en trayectorias rectas y paralelas, Newton en su “Principia” (“Philosophiæ naturalis principia mathematica”, 1687) enunció lo que se denomina la ley de Newton de la viscosidad: “El esfuerzo cortante en cualquier entre fase tangente a la dirección del flujo es proporcional a la variación de la velocidad en la dirección normal al movimiento”; matemáticamente, se expresa:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (5.2.2)$$

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 fluido cualesquiera adyacentes entre sí, du / dy es proporcional a la rapidez de formación angular del fluido y μ es la viscosidad.

En 1904 Ludwig Prandtl publicó uno de los más importantes artículos de la Mecánica de Fluidos, consiguiendo enlazar la teoría clásica con los resultados sobre fricción de los cuerpos sumergidos. Prandtl introdujo el concepto de Capa límite o Capa frontera, una delgada zona de fluido cercana a la superficie de los cuerpos, en la cual se presenta grandes variaciones de velocidad y donde se concentran los efectos viscosos.

La capa frontera es una región, cerca de la pared sólida, paralelamente a la cual se mueve un fluido, donde la velocidad del fluido aumenta desde el valor 0 (o bien, desde el valor que tenga la velocidad de la pared si ésta se mueve) hasta un valor U , a una distancia de la pared indicada con δ .

El efecto de la pared, debido a la viscosidad del fluido, es un frenado que disminuye gradualmente conforme crece la distancia desde la pared, hasta llegar al valor δ donde el efecto desaparece.

Desde el punto de inicio $x=0$ (Figura 5.2.1), con un espesor creciente δ y donde se manifiesta el efecto de las fuerzas viscosas cortantes causadas por la viscosidad del líquido; recibe el nombre de **capa límite de la velocidad**, o **capa límite mecánica**.

El espesor de la capa límite δ . Por lo común se define como la distancia “y” tomada desde la superficie, a partir de la cual $u=0.99u_{\infty}$.

La recta hipotética de $u = 0.99u_\infty$ divide el flujo sobre una placa en dos regiones: la región de capa límite, en la cual los efectos viscosos y los cambios de la velocidad son significativos, y la región de flujo no viscoso, en la cual los efectos de la fricción son despreciables y la velocidad permanece esencialmente constante.

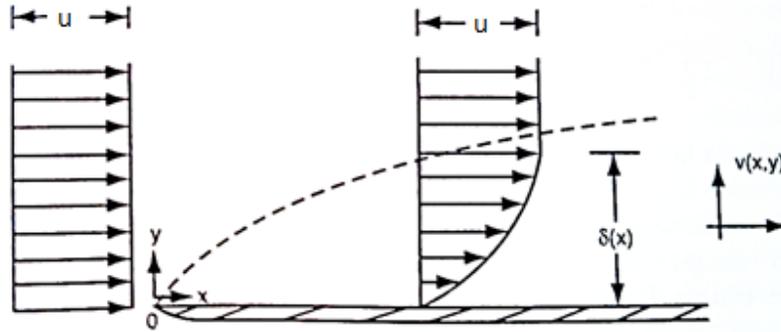


Figura 5.2.1(a) Perfil de velocidades sobre una placa plana.

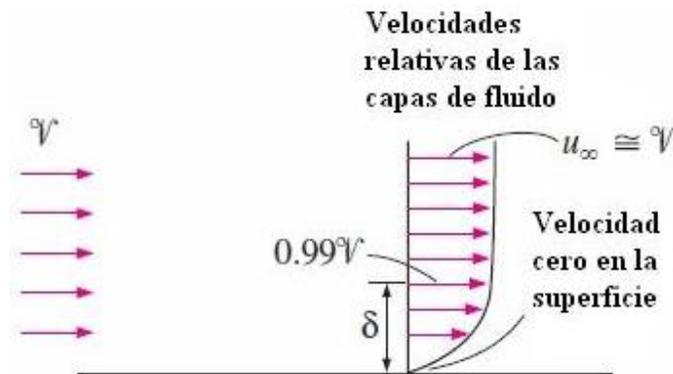


Figura 5.2.1 (b) El desarrollo de una capa límite sobre una superficie se debe a la condición de no deslizamiento

Siempre existen pequeños disturbios y ondas en un fluido que fluye, pero conforme las fuerzas viscosas son mayores, evitan que crezcan los disturbios. Conforme crezca el espesor de la capa frontera laminar, decrecerá la razón de las fuerzas viscosas a las fuerzas de inercia y eventualmente se alcanzará un punto en el que los disturbios no decaerán más si no que crecerá con el tiempo. Entonces, la capa frontera llega a ser inestable y se inicia la transmisión de flujo laminar a turbulento. Se forman remolinos y vórtices y se destruye la regularidad laminar del movimiento de la capa frontera.

Una vez que la capa límite es turbulenta, se desarrolla sobre la pared una delgadísima región conocida como *subcapa viscosa* (Figura 5.2.2), donde las fluctuaciones de velocidad y otras variables típicas del régimen turbulento quedan inhibidas por la presencia de la pared.

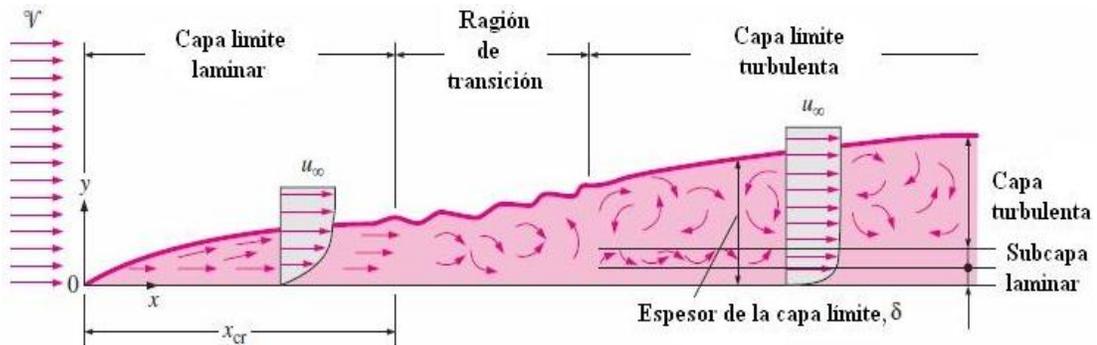


Figura 5.2.2 Desarrollo de la capa límite para el flujo sobre una placa plana y los diferentes regímenes de flujo.

Flujo másico.

Éste se define como la masa que por unidad de tiempo atraviesa una superficie imaginaria en el campo de flujo. Para representar el gasto másico matemáticamente es necesario tomar en cuenta la naturaleza vectorial de la velocidad del fluido y de la orientación que cualquier superficie tiene con respecto a un sistema de coordenadas. Se trata de un elemento diferencial de superficie $dydz$ perpendicular a la dirección x , a lo largo de la cual fluye un fluido de densidad ρ y velocidad u . (Figura 5.2.3).

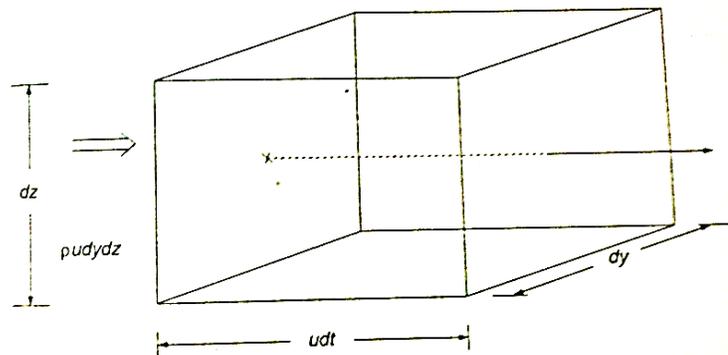


Figura 5.2.3 Gasto másico a través de un elemento de superficie.

Así, el volumen de fluido dV que ha pasado a través del elemento de área $dydz$ en un intervalo de tiempo dt se expresa como:

$$dV = udt dydz \quad (5.2.3)$$

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

$$m = \rho \frac{dV}{dt} = \rho u dydz \quad (5.2.4)$$

Para el Gasto volumétrico

$$Q = \frac{dV}{dt} = u dydz \quad (5.2.5)$$

En el caso de una superficie no diferencial, perpendicular a la dirección del flujo, se tendría, de acuerdo con lo expresado en un párrafo anterior.

$$m = \int_A \rho u dydz \quad (5.2.6)$$

y

$$Q = \int_A u dydz \quad (5.2.7)$$

Respectivamente, relaciones que se reducen a:

$$m = \rho u A \quad (5.2.8)$$

y

$$Q = u A \quad (5.3.9)$$

Continuidad.

Recibe este nombre la ecuación que se obtiene al considerar en un fluido el principio de conservación de la materia. Éste principio de conservación establece que la cantidad de materia que entra al elemento debe de ser la misma masa que sale de él,

$$\begin{array}{ccc} \text{Masa que entra} & & \text{Masa que sale} \\ \text{por unidad de tiempo} & = & \text{por unidad de tiempo} \\ \text{al elemento} & & \text{al elemento} \end{array}$$

esto se puede expresar matemáticamente utilizando el concepto de gasto másico.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5.2.10)$$

La expresión anterior es generalmente conocida como la ecuación de continuidad para flujo incompresible bidimensional estable. Ésta ecuación debe satisfacer el flujo en la capa frontera.

Además de la conservación de la masa, el Flujo del fluido, como cualquier proceso dinámico, está gobernado por la segunda ley de Newton del movimiento. En una forma conveniente la ley puede enunciarse en forma simbólica como:

$$\sum F = \frac{1}{gc} \frac{d(mV)}{d\theta} \quad (5.2.11)$$

O en otras palabras como, la suma de fuerzas que actúan sobre un cuerpo es la rapidez de variación respecto al tiempo de su cantidad de movimiento (es decir, masa x velocidad).

Capa límite en una superficie plana.

Se desarrolla una *capa límite de la velocidad* cuando un fluido fluye sobre una superficie como resultado de que la capa de fluido adyacente a la superficie tome la velocidad de esta (es decir la velocidad cero en relación con la superficie). Asimismo, se define la capa límite de la velocidad como la región en la cual la velocidad del fluido varía desde cero hasta $0.99u$.

De modo semejante se desarrolla una *capa límite térmica* cuando un fluido a una temperatura específica fluye sobre una superficie que está a una temperatura diferente, como se muestra en la figura (5.2.4).

Considere el flujo de fluido a una temperatura uniforme de T_∞ sobre una placa plana isotérmica a la temperatura T_x . Las partículas de fluido en la capa adyacente a la superficie alcanzarán el equilibrio térmico con la placa y tomarán la temperatura superficial T_x . Entonces, estas partículas de fluido intercambiarán energía con las partículas que están en la capa de fluido adjunta, y así sucesivamente.

Como resultado, se desarrolla un perfil de temperaturas en el campo de flujo que va desde T_x en la superficie, hasta T_∞ suficientemente lejos de ésta.

La región del flujo sobre la superficie en la cual la variación de la temperatura en la dirección normal a la superficie es significativa es la *capa límite térmica*.

El espesor de la capa límite térmica δ , en cualquier lugar a lo largo de la superficie se define como la distancia desde la superficie a la cual la diferencia de temperatura $T - T_s$ es igual a $0.99 (T_\infty - T_s)$. Nótese que para el caso especial de $T_s = 0$, se tiene $T = 0.99T_\infty$ en el borde exterior del límite térmico, lo cual es análogo a $u = 0.99u_\infty$ para la capa límite de la velocidad.

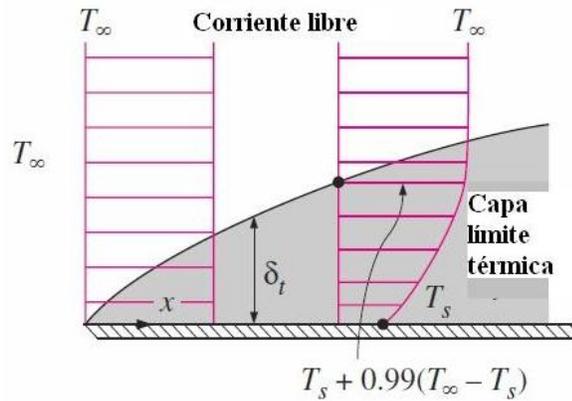


Figura 5.2.4 Capa límite térmica sobre una placa plana.

El espesor de la capa límite térmica aumenta en la dirección del flujo, ya que, corriente más abajo, se sienten los efectos de la transferencia de calor a distancias más grandes de la superficie.

La velocidad de la transferencia de calor por convección en cualquier parte a lo largo de la superficie está relacionada directamente con el gradiente de temperatura en ese lugar. Por lo tanto, la forma del perfil de temperaturas en la capa límite térmica impone la transferencia de calor por convección entre la superficie sólida y el fluido que fluye sobre ella.

En el flujo sobre una superficie calentada(o enfriada), tanto la capa límite de la velocidad como la térmica se desarrollarán en forma simultánea. Dado que la velocidad del fluido tendrá límite de la velocidad en relación con la térmica tendrá un fuerte efecto sobre la transferencia de calor por convección.

La temperatura del fluido en la capa límite térmica varía desde T_s en la superficie hasta T_∞ en el borde exterior de dicha capa. Las propiedades del fluido también varían con la temperatura y, por tanto, con la posición a través de la capa límite.

Para tomar en cuenta la variación de las propiedades con la temperatura, las propiedades del fluido suelen evaluarse en la llamada *temperatura de película* T_f , definida como la media aritmética entre la temperatura de pared y la de corriente libre.

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (5.2.12)$$

Análisis dimensional.

El análisis dimensional establece que dos sistemas que tienen los mismos números adimensionales son idénticos en su comportamiento respecto a estos números particulares. En la convección intervienen nueve magnitudes físicas:

Dimensión	L
Conductividad térmica	k
Velocidad del fluido	v
Densidad del fluido	ρ
Viscosidad dinámica	μ
Calor específico	C_p
Coefficiente de transferencia térmica	h
Dilatación volumétrica del gas	β
Diferencia de temperaturas	ΔT

Los grupos adimensionales normales utilizados en los estudios de convección son:

Número de Reynolds. (Re).- Los diferentes regímenes de flujo y la asignación de valores numéricos de cada uno fueron reportados por O. Reynolds en 1883.

Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de las fuerzas de inercia con respecto a las fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se conoce como número de Reynolds, el cual para flujo externo se expresa como:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\gamma} \quad (5.2.13)$$

Dónde:

V (m/s).-es la velocidad corriente superior (equivalente a la velocidad de la corriente libre para una placa plana)

L (m).- es la longitud característica de la configuración geométrica

γ (m²/s).-es la viscosidad cinemática del fluido. Para una placa plana, la longitud característica es la distancia x desde el borde de ataque.

El número de Reynolds en el cual el flujo se vuelve turbulento se llama **número crítico de Reynolds**.

El valor de este número crítico es diferente para las configuraciones geométricas diferentes. Para el flujo sobre una placa plana, el valor aceptado en general del número crítico de Reynolds es **$Re=5 \times 10^5$** .

Número de Nusselt. (Nu).-La combinación del coeficiente de transferencia de calor por convección h_c , la longitud significativa L y la conductividad térmica del fluido k_f en la forma $h_c L / k_f$ recibe el nombre de módulo de Nusselt, o número de Nusselt.

$$\text{Laminar: } Nu = \frac{hL}{k} = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad Re_L < 5 \times 10^5 \quad (5.2.14)$$

$$\text{Turbulento: } Nu = \frac{hL}{k} = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad (5.2.15)$$

$$0.6 \leq Pr \leq 60$$

$$5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$$

La primera relación da el coeficiente de transferencia de calor promedio para la placa completa cuando el flujo es laminar sobre toda la placa.

La segunda relación lo da para la placa completa sólo cuando el flujo es turbulento sobre toda la placa, o cuando la región del flujo laminar de esta última es demasiado pequeña en relación con la región del flujo turbulento.

El número Nusselts una medida conveniente de transferencia de calor por convección debido a que, una vez conocido su valor, el coeficiente de transferencia de calor por convección puede calcularse.

$$h_c = Nu \frac{k}{L} \quad (5.2.16)$$

Número Prandtl.(Pr).-Es un parámetro que combina exclusivamente las propiedades del fluido. El número de prandtl representa la *relativa difusión* en el fluido de los efectos viscosos y los efectos térmicos.

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{\nu}{a} \quad (5.2.17)$$

Número de Grashof.(Gr).- Es la consecuencia directa de la fuerza de flotación que actúa sobre el fluido cerca de la pared vertical; constituye una medida del cociente de las fuerzas de flotación entre las fuerzas viscosas.

$$Gr = \frac{\beta g (T_0 - T_f)}{\nu^2} \quad (5.2.18)$$

donde β es el coeficiente de expansión volumétrica:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (5.2.19)$$

Número de Nusselt (Nu)	$h(L/k)$
Número de Reynolds (Re)	$\rho vL/\mu$
Número de Prandtl (Pr)	$\mu C_p/k$
Número de Grasshof (Gr)	$gy\Delta TL^3\rho^2/\mu^2$

Los números adimensionales anteriores tienen que son interesantes de recordar:

Nu = coeficiente de transferencia térmica no dimensional.

Re = relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas utilizando la descripción de la convección forzada, donde el fluido tiene una velocidad inicial respecto a la superficie caliente.

Pr = relación entre las difusividades moleculares de cantidad de movimiento respecto al calor.

Gr = relación entre las fuerzas de flotación y las viscosas; sustituye a Re en el caso de la convección natural.

5.3 RADIACIÓN.

Introducción.

Reconocemos que la transferencia de calor por conducción y convección requiere la presencia de un gradiente de temperatura en alguna forma de materia. Por el contrario, la transferencia de calor mediante radiación térmica no requiere materia. Es un proceso en extremo importante, y en el sentido físico es quizá el más interesante de los modos de transferencia de calor.

Es relevante para muchos procesos industriales de calentamiento, enfriamiento y de secado, así como también para métodos de conversión que incluyen la utilización de combustibles fósiles y radiación solar.

Conceptos fundamentales.

Considere un sólido que inicialmente está a una temperatura más alta T_s , que la de sus alrededores T_{al} pero en torno del cual existe un vacío (representado en la figura 5.3.1)

La presencia del vacío evita la pérdida de energía desde la superficie del solido por convección o conducción. Sin embargo el sólido se enfriará y finalmente alcanzará el equilibrio termodinámico con sus alrededores.

Este enfriamiento está asociado con una reducción en la energía interna almacenada por el sólido y es una consecuencia directa de la emisión de radiación térmica desde la superficie. A su vez, la superficie interceptará y absorberá la radiación originada desde los alrededores.

Sin embargo, si $T_s > T_{al}$ la transferencia neta de calor por radiación $Q_{rad\ net}$ es desde la superficie, y la superficie se enfriará hasta que T_s alcance a T_{al} .

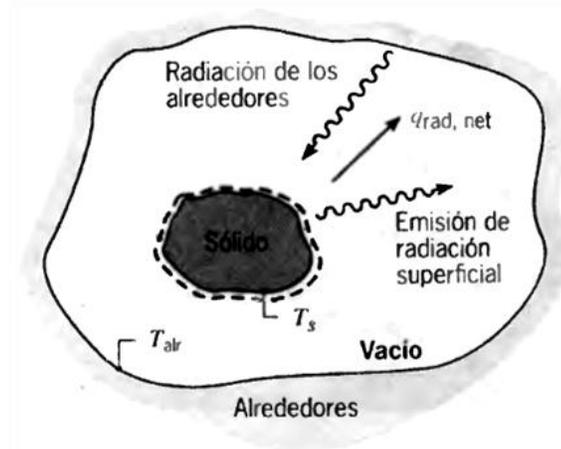


Figura 5.3.1 Enfriamiento por radiación de un sólido caliente.

Asociamos la radiación térmica a la intensidad con que la materia emite energía como resultado de su temperatura finita. En este momento toda la materia que lo rodea está emitiendo radiación: por los muebles y paredes de la habitación, si está dentro de la casa, o por la tierra, edificios, la atmosfera y el Sol si está en el exterior.

El mecanismo de emisión se relaciona con la energía liberada como consecuencia de oscilaciones o transiciones de los muchos electrones que constituyen la materia.

En consecuencia la radiación que se emite desde un sólido o un líquido se origina de moléculas que están a una distancia de aproximadamente $1\mu\text{m}$ de la superficie expuesta.

Es por esta razón que la emisión desde un sólido o líquido en un gas contiguo o un vacío se ve como un fenómeno superficial.

Una teoría considera a la radiación como la propagación de una acumulación de partículas denominadas fotones o cuantos (quanta). Alternativamente, la radiación se puede ver como la propagación de ondas electromagnéticas.

En cualquier caso deseamos atribuir a la radiación las propiedades características de las ondas, frecuencia f y longitud de onda λ . Para radiación que se propaga en un medio particular, las dos propiedades se relacionan mediante

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.3.1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el medio. Para la propagación en un vacío, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$. La unidad de longitud de onda normalmente es la micra (μm), donde $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.

Ha probado ser útil concebir la radiación electromagnética como la propagación de paquetes discretos de energía llamados fotones, como propuso Max Planck en 1900, en conjunción con su teoría cuántica. En esta concepción, cada fotón de frecuencia f se considera que tiene una energía de

$$e = hf = \frac{h}{\lambda} \quad (5.3.2)$$

en donde $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$ es la constante de Planck.

Radiación térmica.

Aun cuando todas las ondas electromagnéticas tienen las mismas características generales, las ondas de distinta longitud difieren de manera significativa en su comportamiento.

La radiación electromagnética que se encuentra en la práctica abarca una amplia gama de longitudes de onda, que varían desde menos de $10^{-10}\mu\text{m}$, para los rayos cósmicos, hasta más de $10^{10}\mu\text{m}$, para las ondas de energía eléctrica. *El espectro electromagnético* también incluye los rayos gamma, los rayos X, la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, la radiación térmica, las microondas y las ondas de radio como se muestra en la figura:

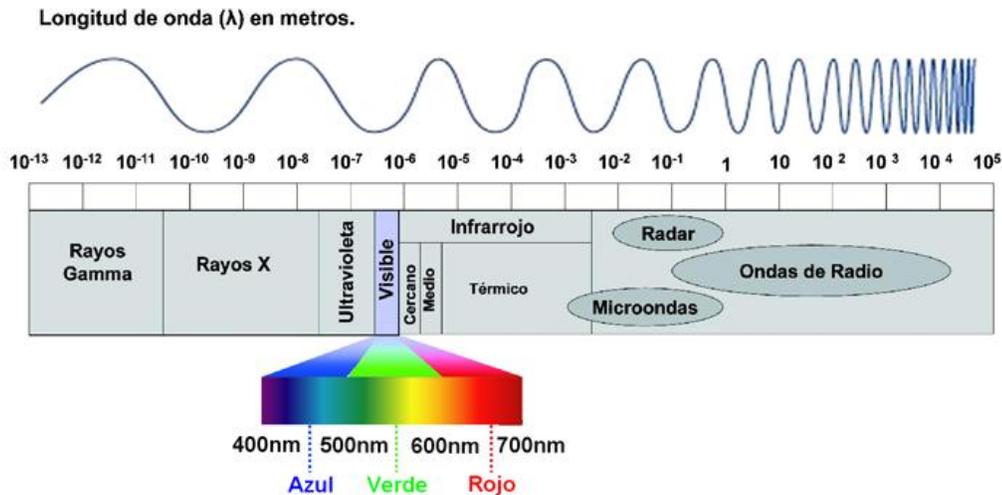


Figura 5.3.2 Espectro de ondas electromagnéticas.

El tipo de radiación electromagnética que resulta pertinente para la transferencia de calor es la radiación térmica emitida como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, los átomos y los electrones de una sustancia.

La temperatura es una medida de la intensidad de estas actividades en el nivel microscópico y la rapidez de la emisión de radiación térmica se incrementa al aumentar la temperatura. La radiación térmica es emitida en forma continua por toda la materia cuya temperatura esta por arriba del cero absoluto.

Es decir, todo lo que nos rodea, constantemente emite (y absorbe) radiación. La radiación térmica también se define como la parte del espectro electromagnético que se extiende desde alrededor de 0.1 hasta 100 μm , dado que la emitida por los cuerpos debida a su temperatura cae casi por completo en este rango de longitudes de onda. Por tanto, la radiación térmica incluye toda la radiación visible y la infrarroja (IR), así como parte de la radiación ultravioleta (UV).

La radiación térmica que emite una superficie abarca un rango de longitudes de onda. Como se muestra en la figura 5.3.3a, la magnitud de la radiación varía con la longitud de onda, y el término espectral se utiliza para referirse a la naturaleza de esta dependencia.

La radiación emitida consiste en una distribución continua no uniforme de componentes monocromáticos (una sola longitud de onda).

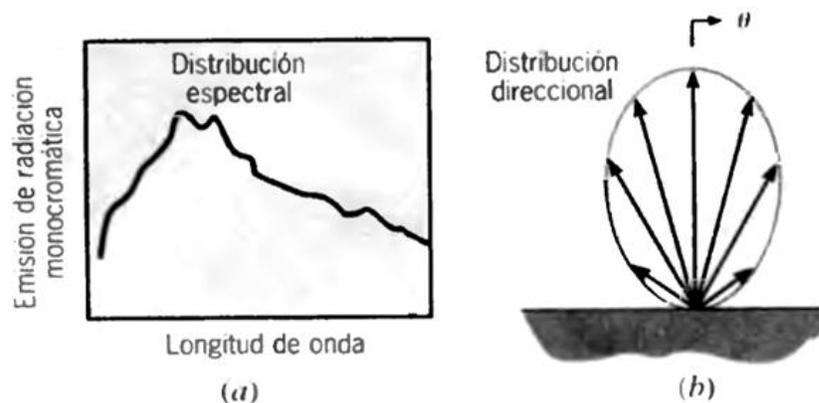


Figura 5.3.3 Radiación emitida por una superficie. a) Distribución espectral.
b) Distribución direccional.

La naturaleza espectral de la radiación térmica es una de las dos características que complican su descripción: la segunda característica se relaciona con su direccionalidad. (Como se ve en la figura 5.3.3b), una superficie puede emitir de forma relevante en ciertas direcciones, con lo que crea una distribución direccional de la radiación emitida. Para cuantificar de forma apropiada la transferencia de calor por radiación, debemos ser capaces de tratar ambos efectos, espectrales y direccionales.

Intensidad de radiación.

La radiación que emite una superficie se propaga en todas las direcciones posibles (figura 5.3.3b) y a menudo estamos interesados en conocer su distribución direccional.

También la radiación incidente sobre una superficie puede venir de diferentes direcciones, y la forma en que la superficie responde a esta radiación depende de la dirección. Tales efectos direccionales se pueden tratar mediante el concepto de intensidad de radiación.

En la figura 5.3.4a vemos que el ángulo plano diferencial $d\alpha$ se define por una región entre los rayos de un círculo y se mide con la razón del elemento de longitud de arco dl sobre el círculo al radio r del círculo. De manera similar, en la figura 5.3.4b el ángulo sólido diferencial $d\omega$ está definido por una región entre los rayos de una esfera y se mide como la razón del elemento de área dA_n sobre la esfera al cuadrado del radio de la esfera.

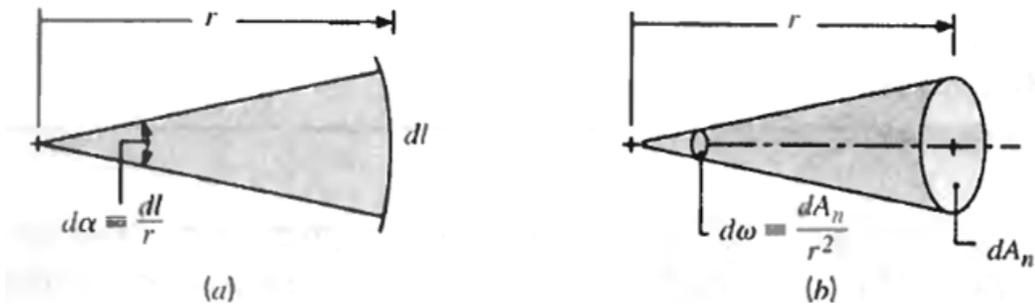


Figura 5.3.4 Definición de ángulos. a) plano. b) sólido.

En consecuencia:

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} \quad (5.3.3)$$

Relación con la emisión.

Cuando un cuerpo absorbe radiación, se incrementa su estado de excitación, sobre todo los electrones situados en un alto nivel energético, produciéndose fuertes vibraciones de las mallas cristalográficas, es decir, aumentan su temperatura. El cuerpo tiende a restablecer su estado primitivo mediante la irradiación de esta energía adicional.

El proceso se desarrolla ahora en sentido inverso; los fotones emitidos de nuevo tienen unas longitudes de onda determinadas que dependen de la variación de energía, aunque el número de posibles valores es a menudo tan grande que podemos considerar que el espectro de emisión es continuo. Cuando un átomo o una molécula alcanza un estado de excitación, habitualmente sólo permanece en él durante un instante muy breve de tiempo, después del cual lo probable es que vuelva a emitir el fotón.

Sin embargo, en un cuerpo sólido o en un gas denso, puede antes de hacer eso, transmitir la energía a los átomos próximos por medio de la acción de las fuerzas inter-atómicas. Por este procedimiento, se iguala la temperatura y se hace más uniforme el estado de excitación del cuerpo. Como resultado de la redistribución de la energía, la radiación emitida puede que tenga una distribución de longitudes de onda diferente de la de absorción. En particular, la distribución depende ahora fundamentalmente de lo que llamamos temperatura del conjunto del cuerpo.

La cantidad térmica radiada por unidad de superficie de un cuerpo excitado térmicamente por unidad de tiempo depende exclusivamente de la temperatura absoluta de dicho cuerpo, de la sustancia de la que está constituido y de la naturaleza de la superficie.

La energía emitida que abandona la superficie por unidad de tiempo y de área la denominamos emisión.

En consecuencia se relaciona con la intensidad espectral de la radiación emitida mediante una expresión de la forma:

$$E_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_{\lambda, e}(\lambda, \theta, \Phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\Phi \quad (5.3.4)$$

La potencia emisiva total hemisférica, E (W/m^2) es la rapidez a la que se emite radiación por unidad de área en todas las longitudes de onda y en todas las direcciones posibles. En consecuencia:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (5.3.5)$$

o de la ecuación (5.3.4)

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, e}(\lambda, \theta, \Phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\Phi d\lambda \quad (5.3.6)$$

al eliminar $I_{\lambda, e}$ del integrando de la ecuación (5.3.4) e integrar, se sigue que

$$E_{\lambda}(\lambda) = \pi I_{\lambda, e}(\lambda) \quad (5.3.7)$$

de manera similar de la ecuación (5.3.6).

$$E = \pi I_e \quad (5.3.8)$$

donde I_e es la intensidad total de la radiación emitida.

Relación con la irradiación.

La intensidad de la radiación incidente se puede relacionar con un flujo radiativo importante, denominado irradiación, que abarca la radiación incidente desde todas las direcciones. La irradiación espectral G_λ ($W/m^2 \cdot \mu m$) se define como la rapidez a la que la radiación de longitud de onda λ incide sobre una superficie, por unidad de área de la superficie y por intervalo de longitud de onda unitaria $d\lambda$ alrededor de λ .

En consecuencia:

$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \Phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\Phi \quad (5.3.9)$$

donde $\sin\theta d\theta d\Phi$ es el ángulo sólido unitario.

Si la irradiación total G (W/m^2) representa la razón a la que incide la radiación por unidad de área desde todas direcciones y a todas las longitudes de onda, se sigue que

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (5.3.10)$$

o de la ecuación (5.3.9)

$$G = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \Phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\Phi d\lambda \quad (5.3.11)$$

Si la radiación incidente es difusa, $I_{\lambda,i}$ es independiente de θ y Φ y se sigue que:

$$G_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,i}(\lambda) \quad (5.3.12)$$

y

$$G = \pi I_i(\lambda) \quad (5.3.13)$$

Relación con la radiosidad.

El último flujo radiativo de interés, denominado radiosidad, explica toda la energía radiante que sale de una superficie. Como ésta radiación incluye la parte reflejada de la irradiación, así como la emisión directa, como se ve en la figura 5.3.5.

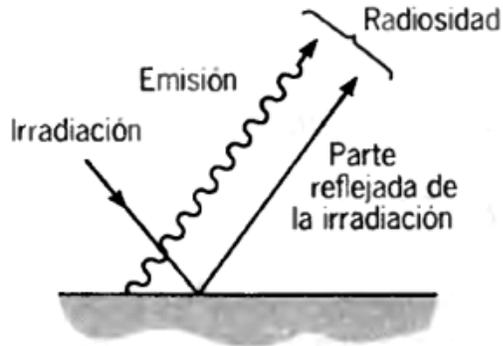


Figura 5.3.5 Radiosidad superficial.

La radiosidad espectral J_λ ($W/m^2 \cdot \mu m$) representa la rapidez a la que la radiación de longitud de onda λ sale de una unidad de área superficial, por intervalo de longitud de onda unitaria $d\lambda$ alrededor de λ . Como explica la radiación que sale en todas direcciones, se relaciona con la intensidad asociada con la emisión y la reflexión $I_{\lambda, e+r}$ (λ, θ, Φ) por una expresión de la forma:

$$J_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, e+r}(\lambda, \theta, \Phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\Phi \quad (5.3.14)$$

De aquí la radiosidad total J (W/m^2) asociada con todo el espectro es

$$J = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda, e+r}(\lambda, \theta, \Phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\Phi d\lambda \quad (5.3.15)$$

Si la superficie es tanto un reflector difuso como un emisor difuso $I_{\lambda, e+r}$ es independiente de θ y Φ , y se sigue que

$$J_{\lambda}(\lambda) = \pi I_{\lambda, e+r} \quad (5.3.16)$$

y

$$J = \pi I_{e+r} \quad (5.3.17)$$

De nuevo el flujo de radiación o en este caso radiosidad, se basa en el área superficial real, mientras que la intensidad se basa en el área proyectada.

Radiación de cuerpo negro.

Cuando se describen las características de radiación de superficies reales, es útil introducir el concepto de cuerpo negro. El cuerpo negro es una superficie ideal que tiene las siguientes propiedades:

1. *Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda y la dirección.*
2. *Para una temperatura y longitud de onda establecida, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro.*
3. *Aunque la radiación emitida por un cuerpo negro es una función de la longitud de onda y la temperatura, es independiente de la dirección. Es decir el cuerpo negro es un emisor difuso.*

Es importante notar que ninguna superficie tiene precisamente las propiedades de un cuerpo negro. La aproximación más cercana se logra con una cavidad cuya superficie interna está a una temperatura uniforme.

Si entra radiación a la cavidad a través de una pequeña apertura (figura 5.3.6a), probablemente experimentará muchas reflexiones antes de resurgir. Por ello es casi absorbida por completo por la cavidad, y se aproxima el comportamiento del cuerpo negro.

Partiendo de los principios termodinámicos se puede demostrar que la radiación que sale de la apertura depende solo de la temperatura de la superficie y que corresponde a la emisión del cuerpo negro (figura 5.3.6b).

Además como el campo de radiación en la cavidad, que es el efecto acumulado de la emisión y reflexión de la superficie de la cavidad, debe ser de la misma forma que la radiación que emerge de la apertura, también se sigue que existe radiación de cuerpo negro dentro de la cavidad. En consecuencia, cualquier superficie pequeña en la cavidad (figura 5.3.6c), experimenta irradiación para la cual $G_\lambda = E_{\lambda b}(\lambda, T)$.

Esta superficie es irradiada de forma difusa, sin importar su orientación. Existe radiación de un cuerpo negro dentro de la cavidad sin importar si la superficie de la cavidad es altamente reflejante o absorbente.

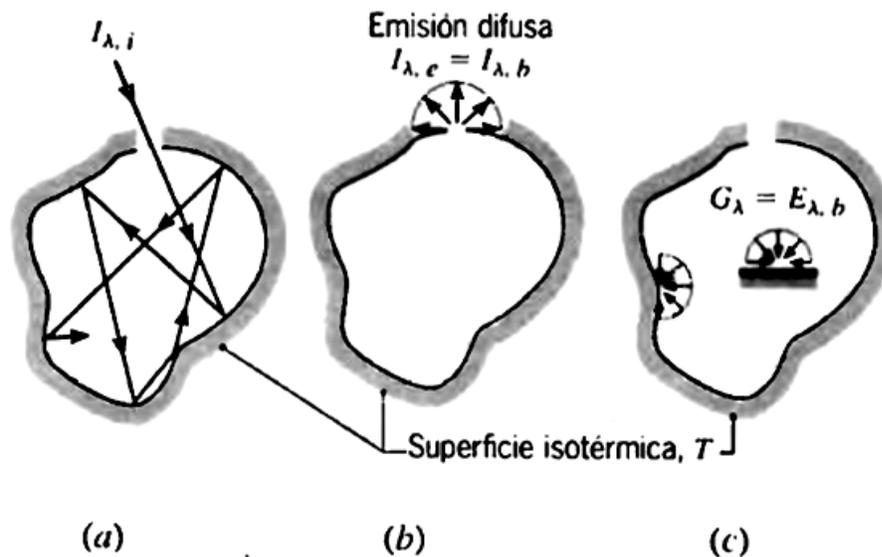


Figura 5.3.6 Características de una cavidad isotérmica de cuerpo negro.

- a) Absorción completa.
- b) Emisión difusa desde una apertura.
- c) Irradiación difusa de superficies interiores.

Distribución de Planck.

La distribución espectral de emisión de cuerpo negro es bien conocida, Planck fué el primero que lo determinó. Esta es la forma

$$I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0 / \lambda kT) - 1]} \quad (5.3.18)$$

Donde $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ y $k = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ son las constantes universales de Planck y de Boltzmann, respectivamente, $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ es la velocidad de la luz en el vacío, y T es la temperatura absoluta del cuerpo negro (K).

Como el cuerpo negro es un emisor difuso, su potencia emisiva espectral es de la forma:

$$E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (5.3.19)$$

donde la primera y segunda constantes de irradiación son:

$$C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

y

$$C_2 = (hc_0 / k) = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

La ecuación (5.3.19) conocida como distribución de Planck, se grafica en la siguiente figura para temperaturas seleccionadas.

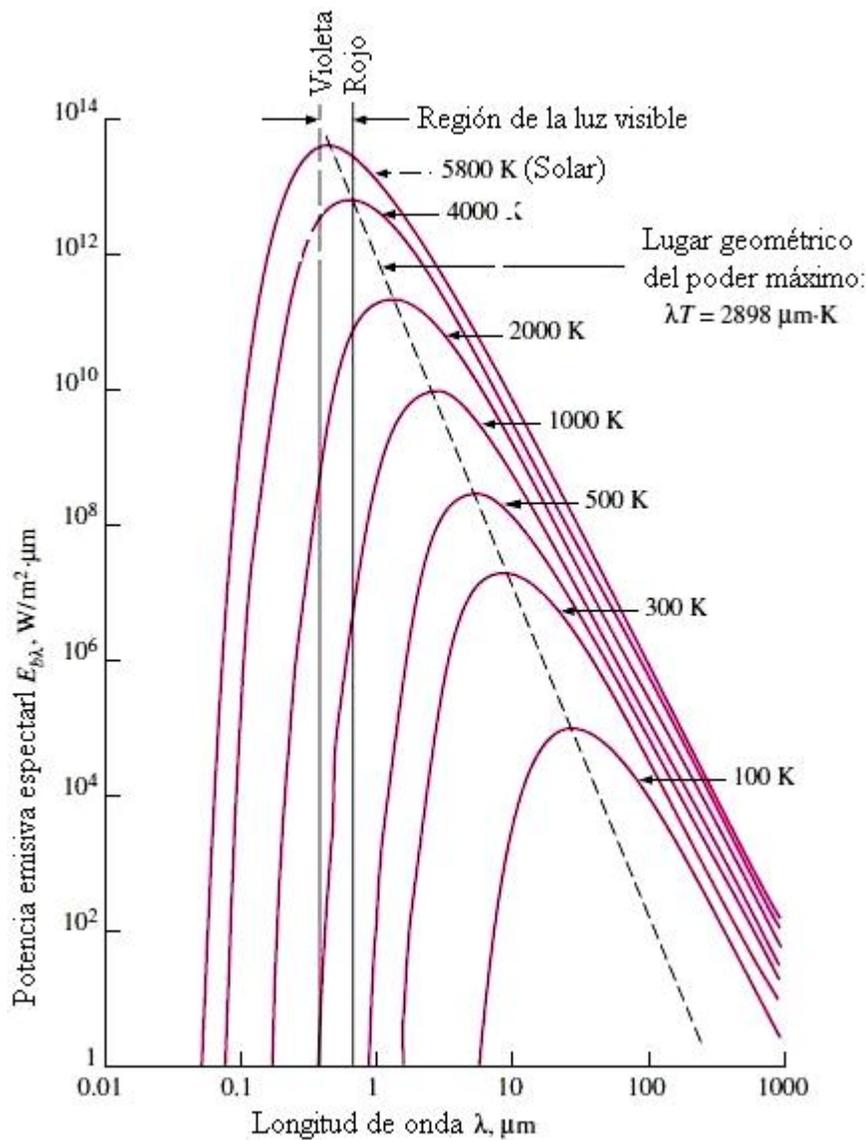


Figura 5.3.7 Potencia emisiva espectral del cuerpo negro.

Se deben constatar varias características importantes.

1. La radiación emitida varía de forma continua con la longitud de onda.
2. En cualquier longitud de onda la magnitud de la radiación emitida aumenta al ascender la temperatura.
3. La región espectral en la que la radiación se concentra depende de la temperatura, dándose comparativamente más radiación que aparece para las longitudes de onda más pequeñas a medida que aumenta la temperatura.

4. Una fracción significativa de la radiación emitida por el Sol, que se puede aproximar como un cuerpo negro a 5800K, está en la región visible del espectro. Por el contrario, para $T \leq 5800\text{K}$, la emisión está de manera predominante en la región infrarroja del espectro y no es visible para el ojo.

Ley de desplazamiento de Wien.

En la figura 5.3.7 de la gráfica vemos que la distribución espectral del cuerpo negro tiene un máximo y que la longitud de onda correspondiente λ_{max} depende de la temperatura.

La naturaleza de esta dependencia se puede obtener al derivar la ecuación (5.3.19) con respecto a λ y hacer el resultado igual a cero. Al hacer esto obtenemos

$$\lambda_{\text{max}} T = C_3 \quad (5.3.20)$$

donde la tercera constante de radiación es $C_3 = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Esta ecuación se conoce como ley de desplazamiento de Wien, y el lugar geométrico de los puntos que describe la ley se grafica como la línea punteada de la gráfica anterior, (Figura 5.3.7).

La ley del desplazamiento de Wien afirma que el máximo de la intensidad de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro ideal se desplaza, con el aumento de la temperatura, hacia la región de longitudes de onda más corta. La ley de Wien dice:

El producto de la temperatura absoluta de un cuerpo negro por la longitud de onda para la cual la radiación emitida es máxima, es igual a una constante.

Ley de Stefan-Boltzmann.

Al sustituir la distribución de Planck, ecuación (5.3.19) en la ecuación (5.3.5), la potencia emisiva total de un cuerpo negro E_b se puede expresar como:

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} d\lambda$$

Al integrar se puede demostrar que:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (5.3.21)$$

Donde la constante de Stefan-Boltzmann, que dependen de las constantes C_1 y C_2 , tiene el valor numérico

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Esta ley permite el cálculo de la cantidad de radiación emitida en todas direcciones y sobre todas las longitudes de onda simplemente a partir del conocimiento de la temperatura del cuerpo negro.

Propiedades de radiación.

Cuando la energía radiante incide contra una superficie material, parte de la radiación se refleja, parte se absorbe y parte se transmite, tal como lo muestra la Figura 5.3.8.

Definimos la reflectividad ρ como la fracción reflejada, la absorptancia α como la fracción absorbida y la transmisividad τ como la fracción transmitida.

Así:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

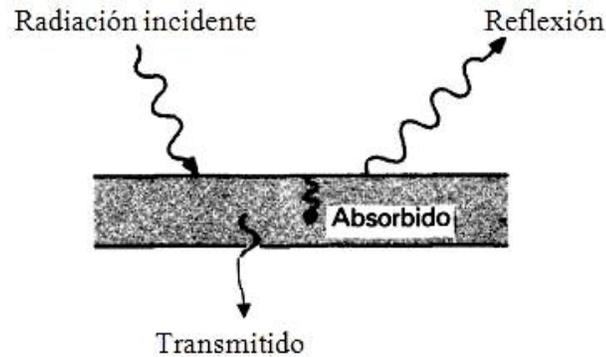


Figura 5.3.8 Dibujo que muestra efectos de radiación incidente.

Cuando la radiación choca con una superficie se pueden observar dos tipos de fenómenos.

Si el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, a ésta se le llama especular.

Por otra parte, cuando un rayo incidente se distribuye en forma uniforme en todas direcciones después de la reflexión, a ésta se le llama *difusa*. Obsérvese que la reflexión especular presenta al observador una imagen reflejada exacta a la de la fuente. Ninguna superficie real es especular o difusa.

Un espejo corriente es especular completamente para la luz visible, pero no de un modo necesario especular a través de la gama entera de longitud de onda de radiación térmica.

Por lo general, una superficie rugosa presenta con mayor facilidad un comportamiento difuso que una superficie perfectamente lisa. De manera similar, una superficie lisa es más especular que una rugosa.

La influencia de la rugosidad de una superficie sobre las propiedades de radiación térmica de los materiales es un tema de gran interés y que continúa siendo objeto de investigación continua.

Capítulo 6

CONCENTRADORES SOLARES

¿Qué es un concentrador solar?

Un **concentrador solar** es un tipo de colector solar, capaz de concentrar la energía solar en un área reducida aumentando la intensidad energética. Similar a una lupa enfocando su luz en un punto, los concentradores reflejan la luz solar por medio de un arreglo de espejos alineados hacia un objetivo capaz de captar dicha energía para su aprovechamiento.

Con los colectores concentradores de energía solar se pueden obtener temperaturas entre 100 y 500 °C si se utilizan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si las superficies tienen un acabado perfecto.

Los colectores concentradores únicamente aprovechan la radiación directa del Sol, para lograr un aprovechamiento máximo deben tener un seguidor solar. Además, el acabado de las superficies del sistema óptico debe ser de buena calidad y mantener sus propiedades por largos periodos de tiempo sin ser deterioradas por el medio ambiente. Por otra parte el receptor debe estar fabricado con un material que resista altas temperaturas.

Los concentradores de enfoque constan fundamentalmente de tres partes: el concentrador o sistema óptico, el receptor donde se encuentra el absorbedor y un mecanismo de seguimiento para el sol.

Lentes de Fresnel. Puede lograrse una alta razón de concentración. Cada segmento concentra mediante refracción la radiación solar incidente en un receptor posicionado centralmente. Existen concentradores lineales y circulares.

Los que utilizan lentes de Fresnel lineales pueden colocarse en hileras, requiriendo sólo un seguimiento unidimensional del sol. En la actualidad se fabrican lentes de Fresnel en acrílico vaciado, con alta calidad óptica, aunque son deteriorados por la incidencia directa de la radiación solar.

Concentradores parabólicos. Los concentradores parabólicos también pueden ser lineales o circulares. Los circulares pueden tener razones de concentración máximas muy grandes (45000), comparada con los lineales (212).

Los **concentradores fijos o semifijos** no necesitan del mecanismo para seguir al sol, pero sólo se pueden obtener temperaturas moderadas.

6.1 LUGAR GEOMÉTRICO DE LA PARÁBOLA.

Una parábola es un lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano de tal manera que su distancia de una recta fija, situada en el plano, es siempre igual a su distancia de un punto fijo del plano y que no pertenece a la recta.

El punto fijo F se llama foco y la recta fija l directriz de la parábola. La definición excluye el caso en que el foco esta sobre la directriz.

Siendo F y l el foco y la directriz de una parábola respectivamente, la recta α que pasa por F y es perpendicular a l se llama eje de la parábola. Sea A el punto de intersección entre el eje y la directriz. El punto V , punto medio del segmento AF , está, por definición, sobre la parábola, este punto se llama vértice.

El segmento de la recta tal como BB' , que une dos puntos cualesquiera diferentes de la parábola se llama cuerda; en particular una cuerda que pasa por el foco como CC' , se llama cuerda focal.

La cuerda focal LL' perpendicular al eje se llama lado recto. Si P es un punto cualquiera de la parábola, La recta FP que une el foco y el punto P se llama radio focal de P o radio vector.

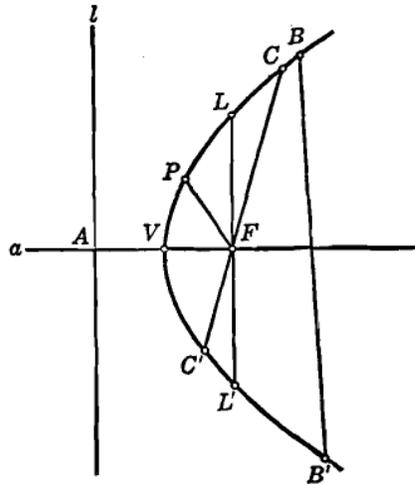


Figura 6.1.1 Lugar geométrico de la parábola

Ecuación de la parábola de vértice en el origen y eje un eje coordenado.

Veremos que la ecuación de una parábola toma su forma más simple cuando su vértice está en el origen y su eje coincide con uno de los ejes coordenados. De acuerdo con esto, consideremos la parábola cuyo vértice está en el origen y cuyo eje coincide con el eje X . Entonces el foco F está sobre el eje X ; sean $(p, 0)$ sus coordenadas.

Por definición de parábola, la ecuación de la directriz l es $x = -p$. Sea $P(x, y)$ un punto cualquiera de la parábola. Por P tracemos el segmento PA perpendicular a l . entonces por la definición de parábola, el punto P debe satisfacer la condición geométrica

$$|FP| = |PA| \quad (6.1.1)$$

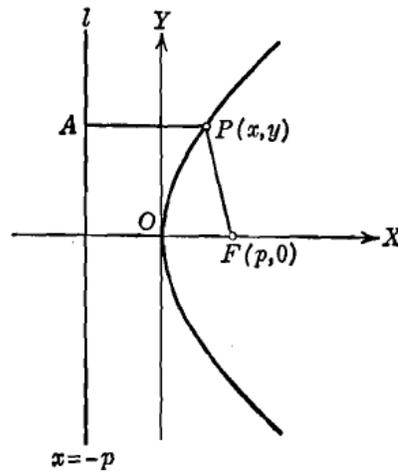


Figura 6.1.2 Parábola con vértice en el origen y eje coordenado X.

Aplicando la fórmula de la distancia entre dos puntos tenemos:

$$|\overline{FP}| = \sqrt{(x-p)^2 + y^2} \quad (6.1.2)$$

También sabemos que:

$$|\overline{PA}| = |x+p| \quad (6.1.3)$$

Por tanto, la condición geométrica (1) está expresada, analíticamente por; por la ecuación:

$$\sqrt{(x-p)^2 + y^2} = |x+p| \quad (6.1.4)$$

Elevando al cuadrado ambos términos de la ecuación y simplificando obtenemos:

$$y^2 = 4px \quad (6.1.5)$$

De manera general se resume en lo siguiente:

La ecuación de una parábola de vértice en el origen y eje el eje X es

$$y^2 = 4px,$$

en donde el foco es el punto $(p, 0)$ y la ecuación de la directriz es $x = -p$. Si $p > 0$, la parábola se abre hacia la derecha; si $p < 0$, la parábola se abre hacia la izquierda.

Si el eje de una parábola coincide con el eje Y, y el vértice está en el origen, su ecuación es

$$x^2 = 4py \tag{6.1.6}$$

en donde el foco es el punto $(0, p)$ y la ecuación de la directriz es: $y = -p$. Si $p > 0$, la parábola se abre hacia arriba, si $p < 0$, la parábola se abre hacia abajo.

Las ecuaciones (6.1.5) y (6.1.6) se llaman a veces *la primera ecuación ordinaria de la parábola*. Como son las ecuaciones más simples de la parábola, nos referimos a ellas como a las formas canónicas.

6.2 GEOMETRÍA DEL CONCENTRADOR.

La figura siguiente muestra un paraboloides de revolución truncado a un ángulo de borde definido y un corte transversal en $x = 0$ de tal forma que permite un análisis simplificado en dos dimensiones.

La ecuación que describe a un paraboloides de revolución en un sistema de coordenadas rectangulares es:

$$x^2 + y^2 = 4fz \tag{6.2.1}$$

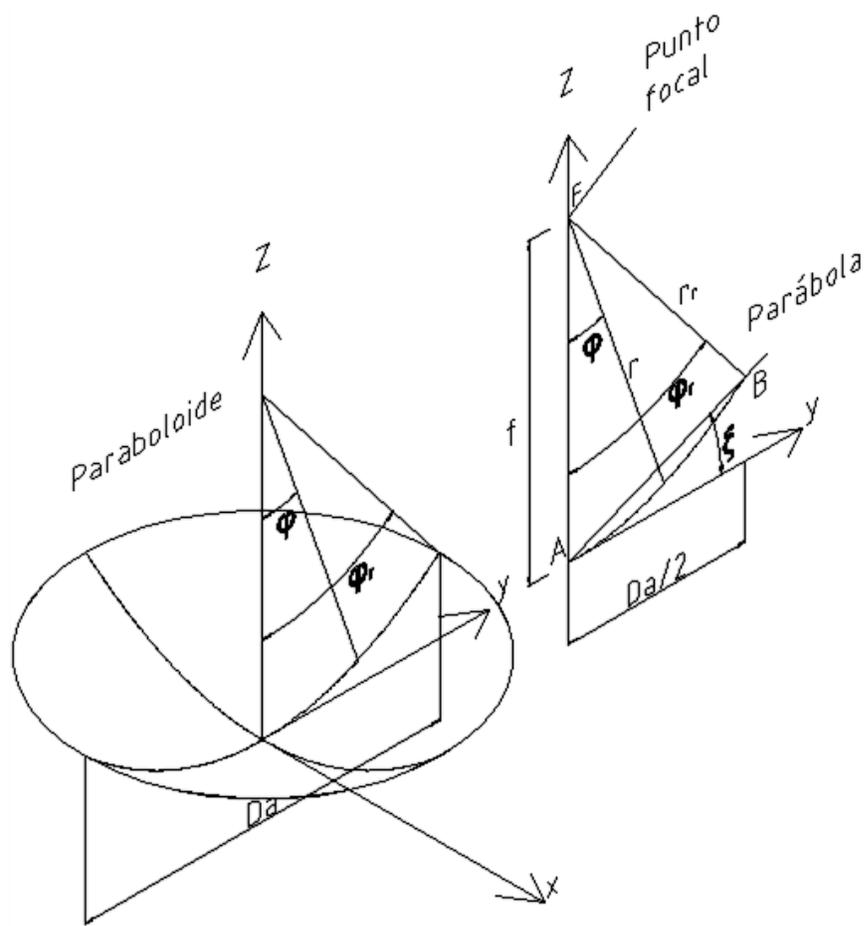


Figura 6.2.1 Paraboloide de revolución y sección transversal que muestra una de las ramas de la parábola.

Donde:

φ_r = Ángulo de borde

D_a = Diámetro de apertura

ξ = Ángulo de diseño

r_r = Radio focal de borde

F = Foco

Sea la ecuación de la parábola con vértice en el origen

$$y^2 = 4fz \tag{6.2.2}$$

y las relaciones tomadas de la figura 6.2.1

$$\tan\varphi r = \frac{y}{f - z} \quad (6.2.3)$$

$$\sin\varphi r = \frac{y}{r} \quad (6.2.4)$$

despejando z de la relación (6.2.3) se tiene que:

$$z = f - \frac{y}{\tan\varphi r} \quad (6.2.5)$$

sustituyendo esta nueva relación en (6.2.2) se obtiene:

$$y^2 = 4f \left[f - \frac{y}{\tan\varphi r} \right]$$

$$y^2 = 4f^2 - \frac{4fy}{\tan\varphi r} \quad (6.2.6)$$

al sustituir la relación (6.2.4) en la ecuación (6.2.6) se tiene:

$$r^2 \sin^2\varphi r = 4f^2 - \frac{4f(r \sin\varphi r)}{\frac{\sin\varphi r}{\cos\varphi r}} \quad (6.2.7)$$

al sustituir la identidad trigonométrica $\cos^2\varphi r + \sin^2\varphi r = 1$ en (6.2.7) esta relación es ahora:

$$r^2 (1 - \cos^2\varphi r) = 4f^2 - 4f r \cos\varphi r \quad (6.2.8)$$

o bien agrupando en forma de binomio cuadrado perfecto:

$$r_r^2 = (2f - r_r \cos\varphi_r)^2 \quad (6.2.9)$$

al tomar raíz cuadrada en ambos miembros de la ecuación se obtiene una ecuación para r_r :

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos\varphi_r} \quad (6.2.10)$$

Esta ecuación nos permite determinar el valor de r_r para un cierto ángulo de borde φ_r con una distancia focal determinada al retirar el subíndice r se puede determinar la distancia entre el punto focal y cualquier punto sobre la rama de la parábola.

O en su analogía la distancia entre el punto focal y la superficie del paraboloide de revolución.

Por otra parte al sustituir en la relación (6.2.4) el valor de $y = Da / 2$ que es la mitad del diámetro de apertura se tiene:

$$r_r = \frac{Da}{2\sin\varphi_r} \quad (6.2.11)$$

y al igualar (6.2.10) y (6.2.11) conduce a:

$$\begin{aligned} \frac{2f}{1 + \cos\varphi_r} &= \frac{Da}{2 \sin\varphi_r} \\ \frac{\sin\varphi_r}{1 + \cos\varphi_r} &= \frac{Da}{4f} \end{aligned} \quad (6.2.12)$$

al sustituir la identidad trigonométrica

$$\frac{\sin\varphi_r}{(1 + \cos\varphi_r)} = \tan \frac{\varphi_r}{2}$$

en (6.2.12) resulta:

$$\tan\left(\frac{\varphi r}{2}\right) = \frac{Da}{4f}$$

y la relación que existe entre el diámetro de apertura, el ángulo de borde y la distancia focal es:

$$f = \frac{Da}{4 \tan\left(\frac{\varphi r}{2}\right)} \quad (6.2.13)$$

Se puede determinar una relación para el ángulo de borde en función del diámetro de apertura y el foco. Multiplicando la ecuación (6.2.6) por $1/y^2$ se tiene:

$$\left[y^2 = 4f^2 - \frac{4fy}{\tan\varphi r} \right] \frac{1}{y^2}$$

$$1 = \frac{4f^2}{y^2} - \frac{4f}{y \tan\varphi r}$$

$$\frac{4f^2}{y^2} - 1 = \frac{\frac{4f}{y}}{\tan\varphi r}$$

$$\tan\varphi r = \frac{\frac{4f}{y}}{\frac{4f^2}{y^2} - 1} \quad (6.2.14)$$

Arreglando términos de manera que en la relación (6.2.14) aparezca el factor $2y$ que corresponde al valor del diámetro de apertura $2y = Da$ se obtiene:

$$\tan\varphi_r = \frac{\frac{8f}{2y}}{16\left(\frac{f}{2y}\right)^2 - 1}$$

$$\tan\varphi_r = \frac{\frac{8f}{Da}}{16\left(\frac{f}{Da}\right)^2 - 1}$$

$$\varphi_r = \tan^{-1}\left[\frac{8\left(\frac{f}{Da}\right)}{16\left(\frac{f}{Da}\right)^2 - 1}\right] = \text{sen}^{-1}\left(\frac{Da}{2r_r}\right) \quad (6.2.15)$$

6.3 IMAGEN SOLAR.

Al ser el Sol la fuente de energía, es muy importante conocer la imagen del mismo reflejada sobre el receptor. En un concentrador parabólico perfecto, los rayos que son paralelos al eje de éste, son todos reflejados y pasan a través de su punto focal.

Sin embargo los rayos solares no son completamente paralelos, ya que a la distancia Tierra – Sol el diámetro solar sustenta un ángulo $\alpha = 32'$ provocando que su foco no sea puntual sino una región. La imagen solar se forma en el plano focal del concentrador, donde se localiza el receptor.

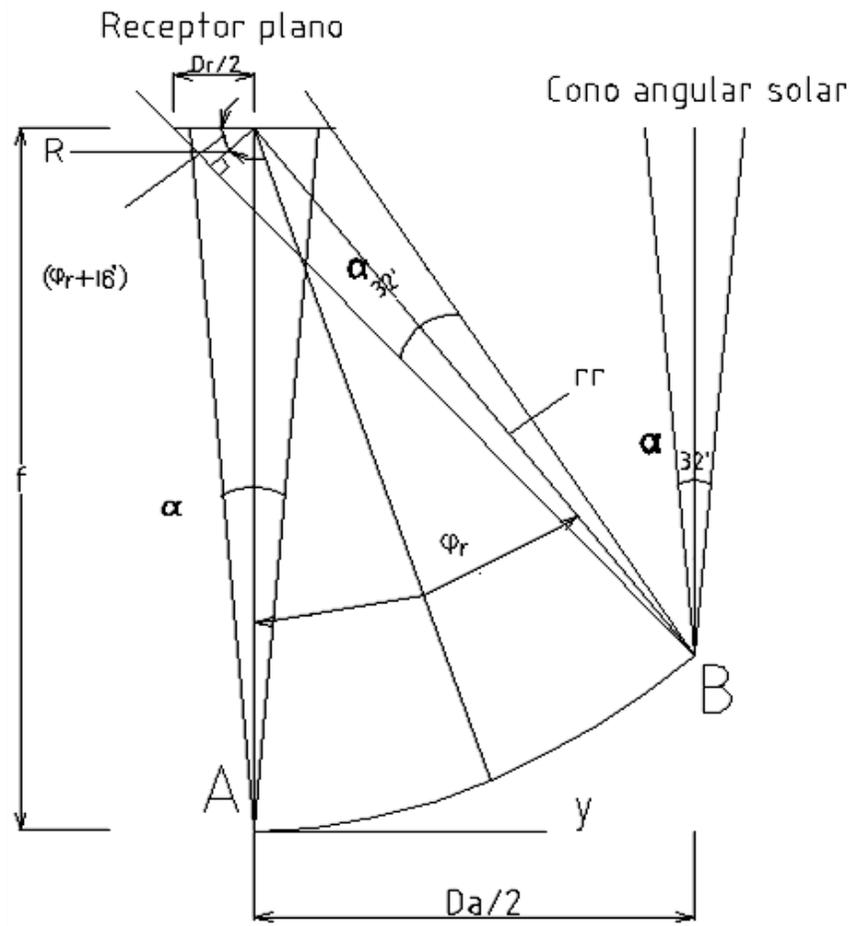


Figura 6.3.1 Dimensión de la imagen en el concentrador parabólico.

De la figura 6.3.1 se tienen las siguientes relaciones

$$Da = 2r_s \cdot \text{sen} \varphi_r \tag{6.3.1}$$

Y el área de apertura es:

$$A_a = \frac{\pi}{4} Da^2 \tag{6.3.2}$$

De la figura se deduce que:

$$\frac{Dr}{2} = \frac{R}{\cos(\varphi_r + 0.267^\circ)} \tag{6.3.3}$$

Donde R es

$$R = r_r \text{ sen } 0.267^\circ \quad (6.3.4)$$

Sustituyendo (6.3.2) en (6.3.4) tenemos D_r tal que:

$$D_r = \frac{2r_r \text{ sen } 0.267^\circ}{\cos(\varphi_r + 0.267^\circ)} \quad (6.3.5)$$

O bien al sustituir $2r_r$ de la relación 6.3.1 en la relación 6.3.5 se tiene:

$$D_r = \frac{D_a \text{ sen } 0.267^\circ}{\text{sen } \varphi_r \cos(\varphi_r + 0.267^\circ)} \quad (6.3.6)$$

6.4 RAZÓN DE CONCENTRACIÓN.

Una manera de saber qué temperaturas se pueden obtener en este tipo de colectores concentradores, es a través de la razón de concentración.

La concentración máxima C_{\max} se define como la relación que existe entre el área de apertura de captación del paraboloide de revolución y el área mínima de captura para la radiación que se encuentra en la imagen solar formada en el receptor tal que:

$$C_{\max} = \frac{A_a}{A_r} \quad (6.4.1)$$

Donde A_a es el área de apertura y A_r es el área de receptor.

Así para determinar la concentración máxima para un receptor plano de diámetro D_r en un paraboloide de revolución con diámetro de apertura D_a se establece:

$$C_{\max} = \frac{A_a}{A_r} = \frac{\frac{\pi}{4} D_a^2}{\frac{\pi}{4} D_r^2} = \frac{D_a^2}{D_r^2} \quad (6.4.2)$$

Donde al sustituir las relaciones (6.3.1) y (6.3.5) conducen a:

$$C_{\max} = \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^2 = \left(\frac{\sin \varphi_r \cos(\varphi_r + 0.267^\circ)}{\sin 0.267^\circ} \right)^2 \quad (6.4.3)$$

Esta ecuación no contempla la dispersión angular en el receptor. Esta dispersión puede deberse principalmente a tres causas: seguimiento solar inapropiado; rugosidades inherentes en la superficie y por mal conformado en la superficie, aunque pueden existir otras como son: la absorción, la sombra de los soportes, la suciedad de la superficie reflectora etc.

De tal forma que pueden llegar a adquirir una importancia considerable si se desea obtener concentraciones elevadas.

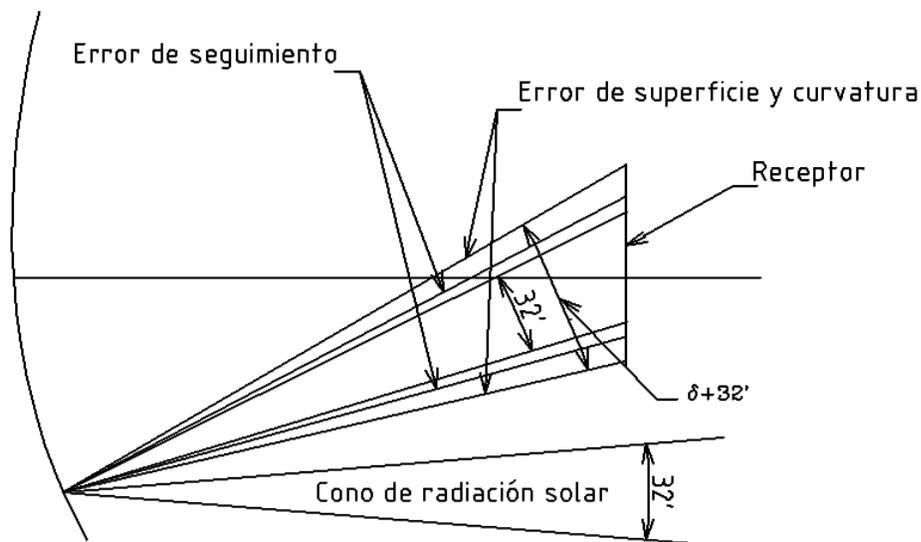


Figura 6.3.2 Segmento del concentrador que muestra la dispersión angular.

Al considerar que la intercepción de toda la radiación especular reflejada se encuentra en un cono angular con $(0.53^\circ + \delta)$ la ecuación (6.4.3) es ahora:

$$C_{\max} = \frac{\sin^2 \varphi_r \cos^2 \left(\varphi_r + 0.267^\circ + \frac{\delta}{2} \right)}{\sin^2 \left(0.267^\circ + \frac{\delta}{2} \right)} \quad (6.4.4)$$

La temperatura máxima que se puede alcanzar en el foco de un concentrador solar parabólico está dada por:

$$T_{\max} = T_{\text{sol}} \left[\frac{C_{\max}}{C_{\max \text{ ideal}}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6.4.5)$$

Donde T_{sol} es la temperatura efectiva del Sol de aproximadamente 5800K, C_{\max} es la concentración del concentrador y $C_{\max \text{ ideal}}$ es la razón de concentración máxima ideal.

6.5 ENERGÍA DISPONIBLE EN EL RECEPTOR.

Al realizar un balance de energía se puede determinar que el calor útil Q_u está dado por la energía recibida en el absorbedor Q_{abs} menos las pérdidas de calor al medio ambiente Q_{per} , por lo que:

$$Q_u = Q_{\text{abs}} - Q_{\text{per}} = Q_{\text{abs}} - U(T_{\text{abs}} - T_a) A_r \quad (6.5.1)$$

donde:

U es el coeficiente global de pérdidas.

T_{abs} es la temperatura del absorbedor.

T_a es la temperatura del aire ambiente.

La energía Q_{abs} que se dispone en el absorbedor se puede determinar mediante la relación.

$$Q_{\text{abs}} = \eta_o A_a I_d \quad (6.5.2)$$

donde:

η_o es la eficiencia óptica del colector.

I_d es la radiación solar directa que incide sobre el colector.

A_a es el área de apertura del colector.

Si la eficiencia instantánea del concentrador es:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{I_d A_a} \quad (6.5.3)$$

entonces:

$$\eta_c = \frac{Q_{\text{abs}}}{A_a I_d} - \frac{U(T_{\text{abs}} - T_a)}{I_d} \frac{A_r}{A_a} = \eta_o - \frac{U(T_{\text{abs}} - T_a)}{I_d} \frac{1}{C} \quad (6.5.4)$$

6.6 TIPOS DE CONCENTRADORES.

Cualquier sistema que aumente el valor de la radiación, es adecuado para obtener temperaturas elevadas. El aumento del valor de la radiación se consigue por:

- Lentes de concentración.
- Espejos.
- Superposición de fluidos radiantes.

Las lentes se clasifican en convergentes y divergentes, según sea un haz de rayos luminosos paralelos, al atravesar la lente, converjan en un punto o se separen de él.

Las lentes divergentes no pueden concentrar, ya que los rayos luminosos que las atraviesan siempre se separan entre sí.

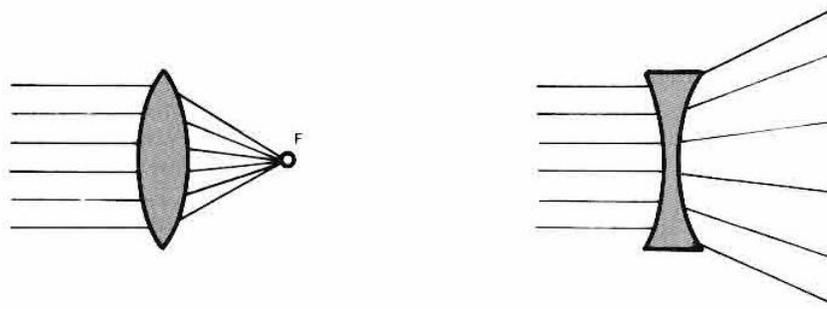


Figura 6.6.1 Un haz de rayos luminosos paralelos converge o diverge al atravesar, respectivamente, una lente convergente o divergente.

Las lentes convergentes presentan unos parámetros de interés que son:

- Área de apertura.
- Distancia focal.

El área de apertura es la superficie útil a través de la cual pueden pasar libremente los rayos solares. Cuanto mayor sea la superficie de apertura, mayor cantidad de energía pasará a través de la lente y, por lo tanto, dispondremos de mayor potencia.

La distancia focal es aquella distancia medida en metros desde el centro de la lente al punto (foco) en el cual convergen los rayos solares. Dependiendo de la curvatura de la lente, la distancia focal puede ser muy corta o muy larga.

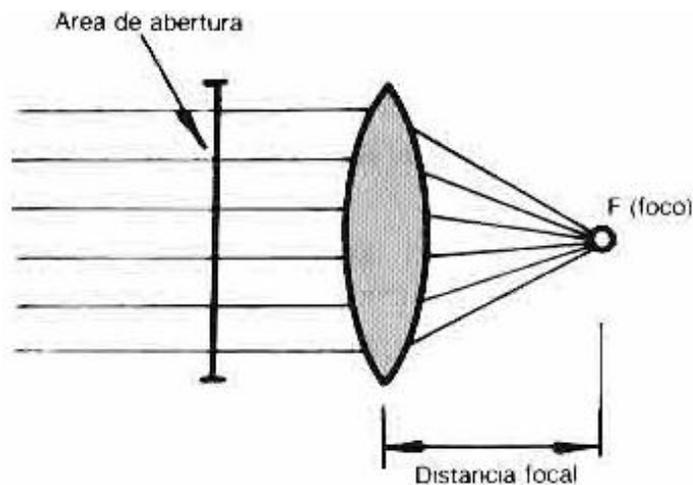


Figura 6.6.2 Distancia focal y área de apertura de una lente

En el caso que los rayos incidentes sean paralelos y la lente perfecta, el foco es el punto donde convergen los rayos solares. Sin embargo, estas circunstancias no se dan nunca y el foco siempre es una mancha focal. En lugar de ser un punto sin dimensiones. La proyección de la mancha focal sobre una superficie da lugar al área de recepción.

Se llama relación de concentración al cociente entre el área de apertura y el área de recepción. Si las lentes fueran perfectas, la relación de concentración en el foco sería infinita.

Sin embargo, el área de recepción no tiene que estar en el foco necesariamente; puede estar un poco antes o un poco después de él, y en estos casos, la relación de concentración será menor que el máximo posible.

Debido a sus especiales características (elevado peso y precio, fragilidad, etc.), las lentes no suelen ser empleadas en aplicaciones de energía solar, excepto para algunos usos menores; en lugar de lentes se emplean espejos.

Los espejos tienen características similares a las de las lentes, pudiendo ser, cóncavos, convexos y planos. Los espejos convexos se comportan de un modo parecido a las lentes divergentes y, por esta razón, no se usan en energía solar.

Los espejos cóncavos tienen un comportamiento similar a las lentes convergentes, pero de todos los espejos cóncavos posibles (esféricos, parabólicos, elípticos, hiperbólicos etc.), solo los espejos parabólicos tienen la propiedad de tener un foco puntual y de comportarse igual que una lente convergente.

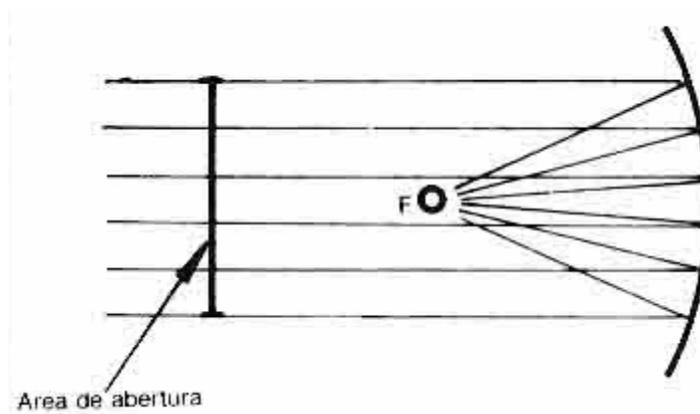


Figura 6.6.3 Un espejo parabólico se comporta igual que una lente convergente

Al igual que una lente convergente un espejo parabólico posee un área de apertura que es la superficie en la cual inciden los rayos solares, y un foco donde todos los rayos paralelos que llegan al espejo se concentran.

Los espejos presentan, sobre las lentes, ventajas importantes como su ligereza, poco precio etc., lo que hace que sean ampliamente utilizados en energía solar.

El aumento del valor de la radiación también puede conseguirse mediante superposición de flujos radiantes en una determinada área de recepción; esto se puede lograr con espejos planos convenientemente dirigidos. Los espejos planos tienen la ventaja sobre los curvados de su menor precio, por lo que son frecuentes en instalaciones grandes.

De lo anteriormente visto se deduce que pueden construirse colectores solares de concentración utilizando lentes, espejos curvados o espejos planos, de hecho las lentes son poco usadas y los colectores de concentración se realizan mediante espejos, en la mayor parte de los casos.

Las formas más usuales de espejos utilizados en colectores solares son las siguientes:

- Cilindro – parabólicos
- Doble – parabólicos
- Helióstatos

Cilindro - parabólicos (Reflectores cilíndricos).

Los reflectores de canal parabólico tienen un foco de línea. No obstante, como los rayos que llegan del disco en un punto particular son convergentes, los rayos reflejados serán divergentes, y así, incluso con un reflector ópticamente perfecto, la imagen del sol en la línea focal no será un punto, sino que tendrá una cierta anchura.

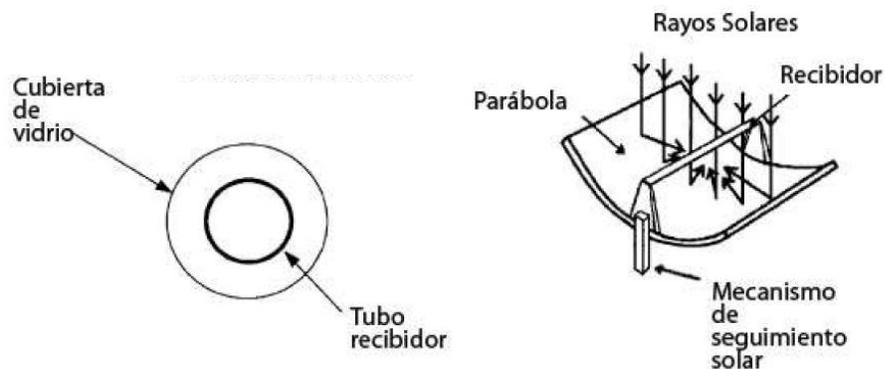


Figura 6.6.4 Concentrador cilíndrico.

Con este tipo de concentradores se pueden obtener razones de concentración geométrica de hasta 216 para seguimiento de un eje y temperaturas de hasta 400°C. Son diseñados con estructuras ligeras y costo bajo, su aplicación más común es la producción de calor de proceso. Tienen una buena eficiencia y un alto rendimiento.

Este tipo de concentradores se conforma mediante el doblado de lámina (de material reflectivo) con un perfil parabólico.

En la línea focal que se logra mediante el conformado de dicha lámina se coloca un tubo que consta de una superficie absorbadora, una cubierta selectiva que tiene alta absorción para radiación solar, pero una baja emisividad para pérdidas térmicas por radiación, también es común que dicho tubo esté confinado por un tubo de vidrio como envolvente, lo que permite reducir las pérdidas de calor por convección hacia los alrededores.

Cuando la apertura del canal parabólico está apuntada hacia el Sol, esto es, los rayos incidentes son paralelos al eje de la parábola, el reflector permite que estos sean dirigidos hacia el foco donde se localiza el tubo receptor.

Como cualquier otro captador de concentración, solo pueden aprovechar la radiación solar directa, lo que exige que el concentrador vaya modificando su posición durante el día.

Doble - parabólicos (Reflectores paraboloides).

El paraboloide se produce a partir de la rotación de una parábola alrededor de su eje. Para ser efectivos, estos concentradores deben seguir al sol, tanto en azimut como en altitud.

Podemos distinguir paraboloides de foco corto y de foco largo. Este último requiere un mecanismo de seguimiento más preciso, pero puede llevar un disco de absorción plano y es más fácil lograr una precisión óptica con este tipo.

Con reflectores de foco corto, el absorbador normalmente es hemisférico y tiene cierta tolerancia en la direccionalidad y por lo tanto el seguimiento no precisa ser tan exacto, pero es mucho más difícil lograr una precisión óptica con estos paraboloides profundos.

Los mejores resultados se han logrado con reflectores con un ángulo de borde de 90° . El problema central en el diseño de reflectores paraboloides es el mecanismo de seguimiento. La solución más simple es el montaje azimutal, que permite la rotación sobre un eje vertical y una inclinación sobre un eje horizontal.

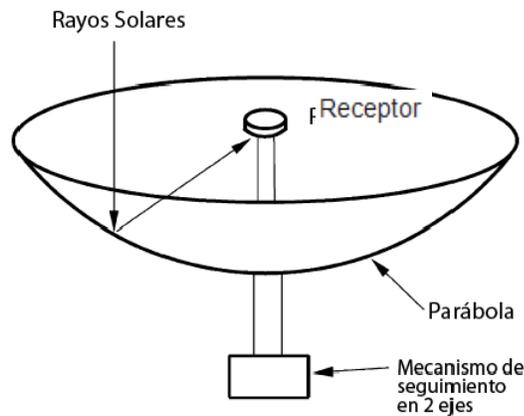


Figura 6.6.5 Concentrador parabólico

Helióstatos.

Los heliostatos constan de una estructura soporte y de una superficie reflectante. Asimismo, tienen incorporados unos mecanismos que permiten que la superficie reflectante se mueva según dos ejes de giro, de modo que pueda captar de la mejor forma y en cada momento la radiación solar y concentrarla en el receptor instalado en la torre.

Para mover los heliostatos, se utilizan medios electrónicos: cada espejo recibe periódicamente las órdenes que emite un programa incorporado a un ordenador central.

El receptor tiene una serie de tubos por los que circula un fluido primario (agua, sales fundidas, aire, etc.) que transmite la energía recibida a un fluido secundario que, convertido en vapor, acciona una turbina. Esta mueve un alternador el cual produce electricidad, el vapor vuelve a convertirse en agua por medio de enfriadores y el ciclo termodinámico se repite.

En algunas instalaciones, es el propio fluido primario quien, convertido en vapor por efecto de la radiación solar, acciona directamente la turbina, sin necesidad del fluido secundario.

En los sistemas de torre o de receptor central el intercambio radiativo/convectivo se produce de forma elegante y centralizada en un intercambiador de calor ubicado encima de una torre.

Por los altos flujos de radiación incidente (típicamente entre 300 y 1000 kW/m²), permiten trabajar a altas temperaturas e integrarse en ciclos más eficientes de forma escalonada.

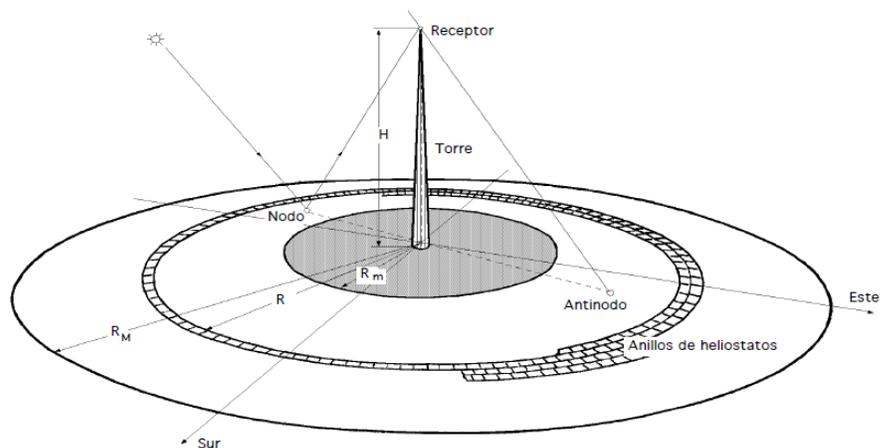


Figura 6.6.6 Esquema de central Termo solar.

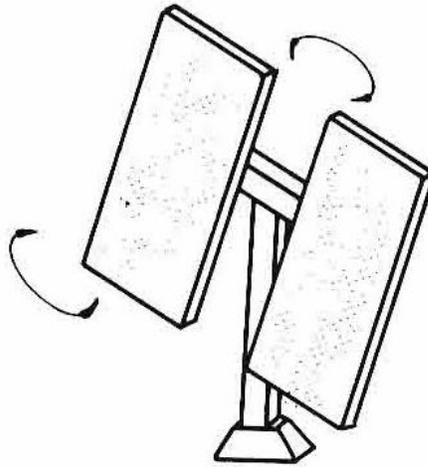
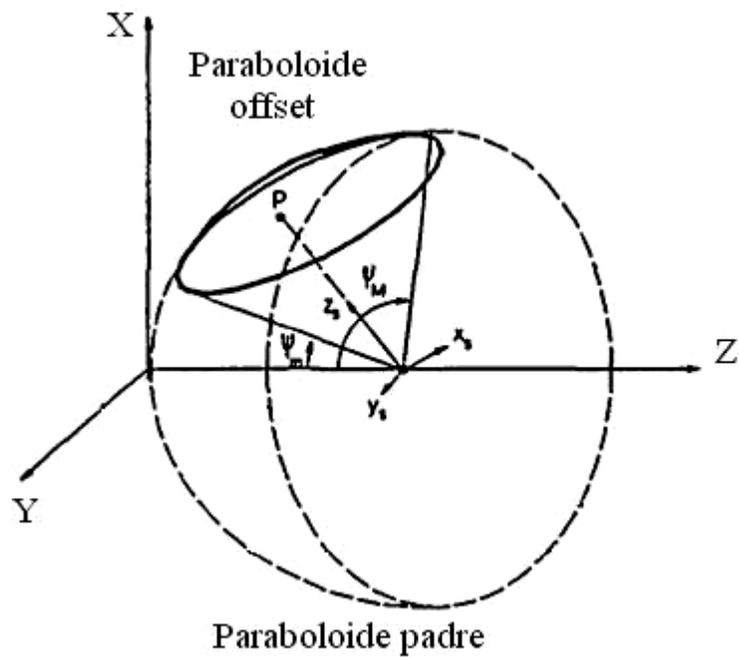


Figura 6.6.6 Heliostato consta de varios espejos planos, que pueden orientarse, y que están montados sobre un soporte

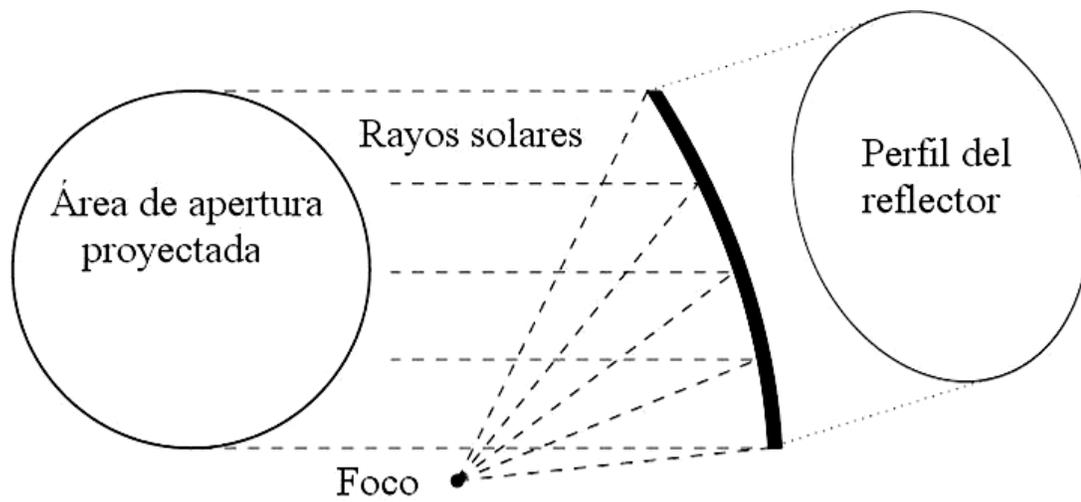
Reflectores offset.

Los concentradores parabólicos offset o descentrados están formados de un corte lateral de una superficie de revolución parabólica.

En este tipo de concentradores el receptor o absorbedor se mantiene en el foco, y la característica principal a destacar es su alta eficiencia, ya que la sombra del receptor se desplaza fuera de la superficie reflectora, aumentando el área efectiva del reflector y por ende su eficiencia.



(a)



(b)

Figura 6.6.7 Geometría de un reflector parabólico offset: a) Representación tridimensional.
b) Sección transversal.

Capítulo 7

DISEÑO DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN

En este capítulo se hace un análisis energético del sistema de fundición, el análisis se considera en un régimen estacionario por lo que los flujos de calor se consideran constantes, también se considera que no hay imperfecciones en la superficie reflectora del concentrador y que el ángulo de dispersión es cero.

El flujo de energía en forma de calor se produce principalmente por conducción, convección y radiación.

7.1 GEOMETRÍA DEL CONCENTRADOR.

Ya que se partió de una antena parabólica offset ya construida, para determinar el punto focal se tomó en cuenta la ecuación de la parábola de vértice en el origen y eje coordenado

$$x^2 = 4py$$

y la ecuación de la recta en su forma punto pendiente,

$$y = mx + b$$

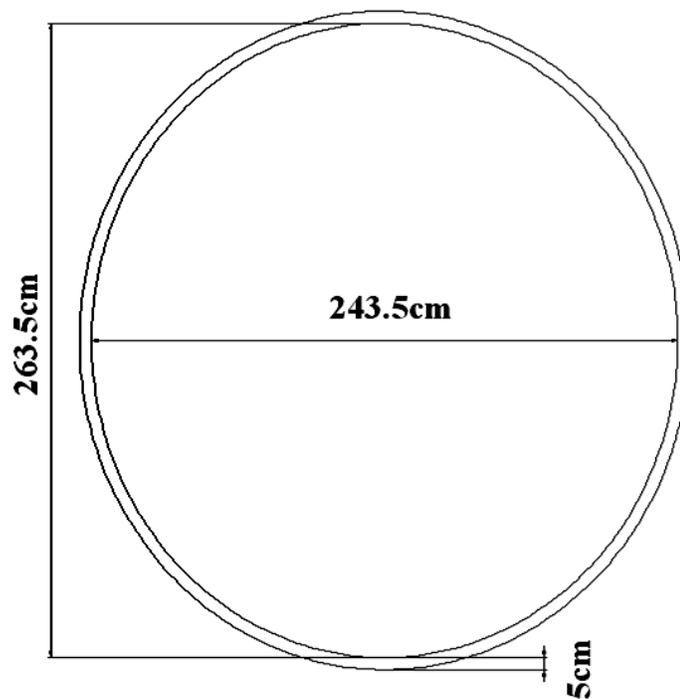


Figura 7.1.1 Dimensiones de los diámetros de la parábola.

Se tomaron dimensiones de los diámetros mayor y menor así como la profundidad máxima de la parábola, que en la figura 7.1.2 corresponde al punto 1 P₁, el punto 2 corresponde al diámetro mayor y teniendo en cuenta que el ángulo de diseño es 22.7°, se hicieron iteraciones sucesivas hasta que las distancias focales de los dos puntos convergieran en un punto (foco), se determinó que el punto focal se encuentra a 147cm.

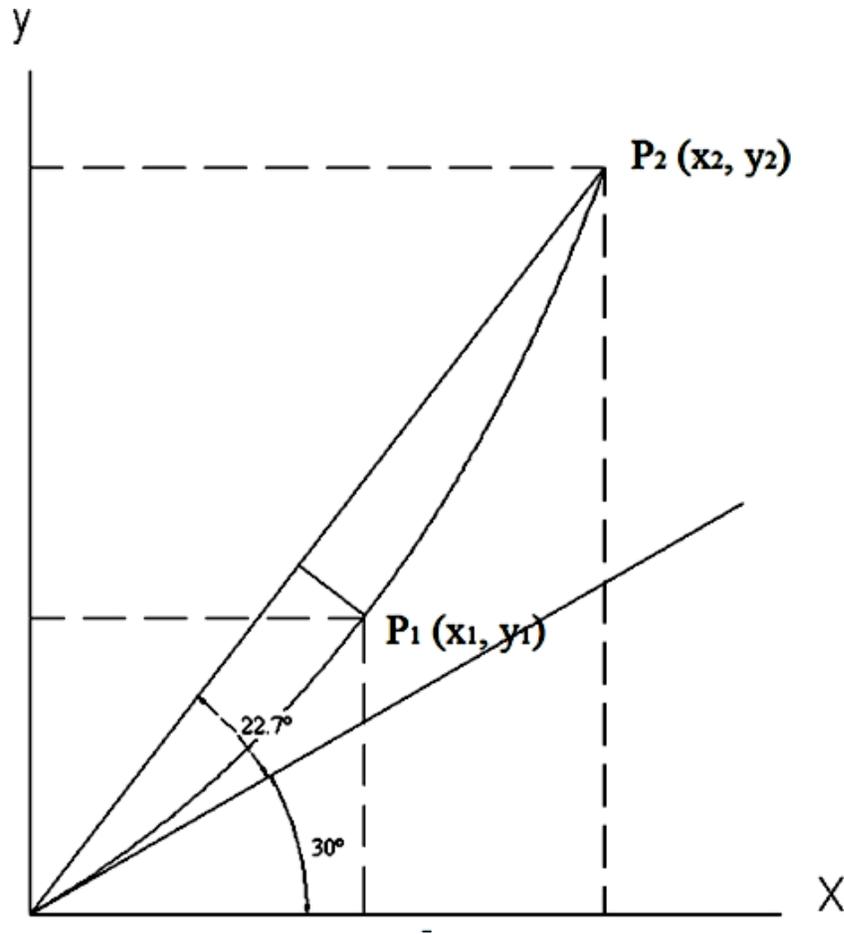


Figura 7.1.2 Geometría del concentrador offset.

Teniendo como datos el ángulo de diseño 22.7 y el diámetro de apertura del concentrador, se obtiene el ángulo de borde

$$Da = 243.5 \text{ cm}$$

$$f = 147 \text{ cm}$$

Sustituyendo en

$$\varphi_r = \tan^{-1} \left[\frac{8 \left(\frac{f}{Da} \right)}{16 \left(\frac{f}{Da} \right)^2 - 1} \right] = \text{sen}^{-1} \left(\frac{Da}{2r_r} \right)$$

Se obtiene

$$\varphi_r = 79.2^\circ$$

Teniendo el ángulo de borde, el radio de borde se calcula por

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos\phi_r}$$

$$r_r = 247.6 \text{ cm}$$

Para determinar la imagen solar se siguió una analogía similar a la expuesta en el capítulo 6, solo que aquí el concentrador ha sido girado 30° que corresponden a la altura solar y el absorbedor es vertical, sustituyendo en la ecuación resultando que la imagen solar tiene un diámetro de 2.74cm.

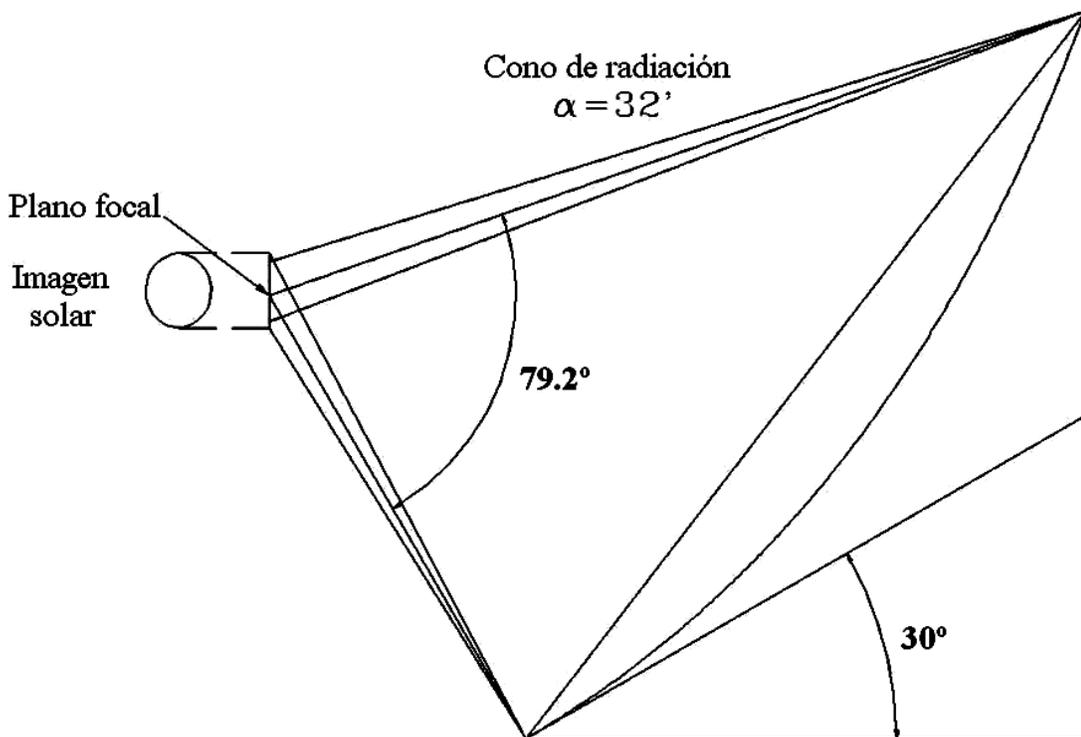


Figura 7.1.3 Imagen del Sol en el concentrador offset. La figura no está a escala.

De la figura 7.1.4 se tiene que :

$$\text{sen}0.267 = \frac{R}{f}$$

Despejando R

$$R = f \operatorname{sen} 0.267^\circ$$

Sustituyendo $f = 147\text{cm}$.

$$R = 0.685\text{cm}$$

de la figura 7.1.4 también se observa que

$$\frac{D_r}{2} = \frac{R}{\operatorname{sen} 30^\circ}$$

sustituyendo $R = 0.685\text{cm}$ y despejando D_r , se encuentra que el diámetro del receptor es

$$D_r = 2 \left(\frac{0.685\text{cm}}{\operatorname{sen} 30^\circ} \right)$$

$$D_r = 2.74\text{cm}$$

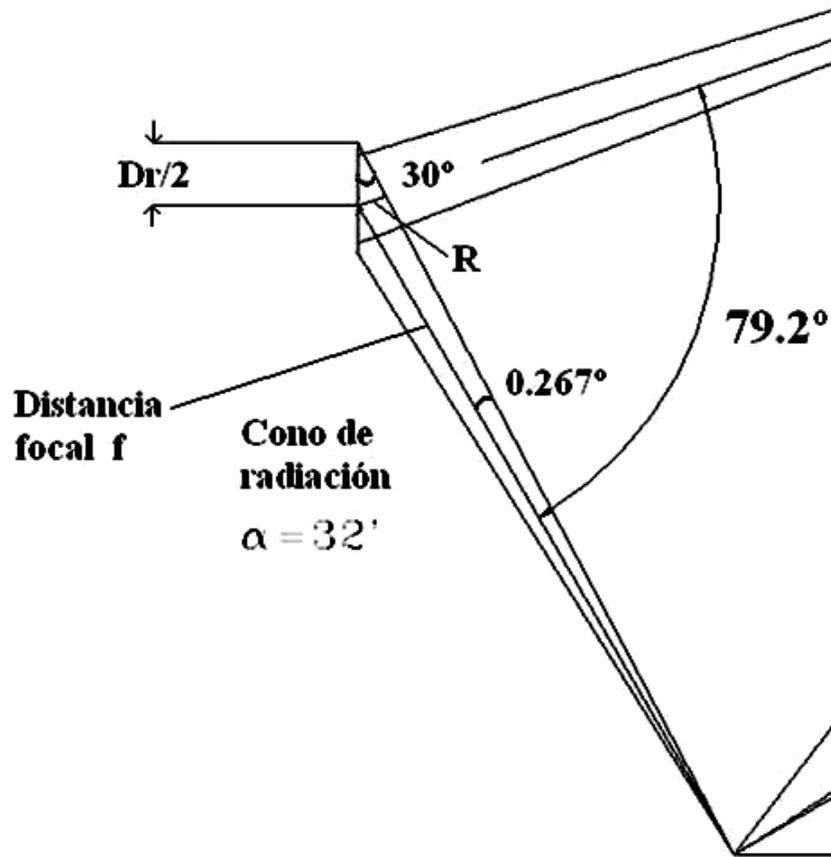


Figura 7.1.4 Detalle de la geometría del diámetro del receptor

La máxima relación de concentración se calcula a partir de

$$C_{\max} = \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^2 = \left(\frac{\text{sen} \varphi r \cos(\varphi r + 0.267^\circ)}{\text{sen} 0.267^\circ} \right)^2$$

$$C_{\max} = 7897.6$$

y la temperatura máxima en el foco se obtiene mediante la fórmula

$$T_{\max} = T_{\text{sol}} \left[\frac{C_{\max}}{C_{\max \text{ ideal}}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

siendo

$$T_{\text{sol}} = 5800\text{K}$$

$$C_{\text{max}} = 7897.6$$

$$C_{\text{max ideal}} = 46000$$

$$T_{\text{max}} = 3733.4^{\circ}\text{C}$$

7.2 ANÁLISIS TÉRMICO DEL SISTEMA.

Pérdidas por conducción.

Si entre dos puntos de un sólido existe una diferencia de temperaturas, se produce una transferencia de energía interna en forma de calor que va desde el punto de mayor temperatura hasta el punto donde la temperatura es menor.

Las pérdidas de calor por conducción en el sistema de fundición se producen en tres direcciones como se muestra en la figura 7.2.1.

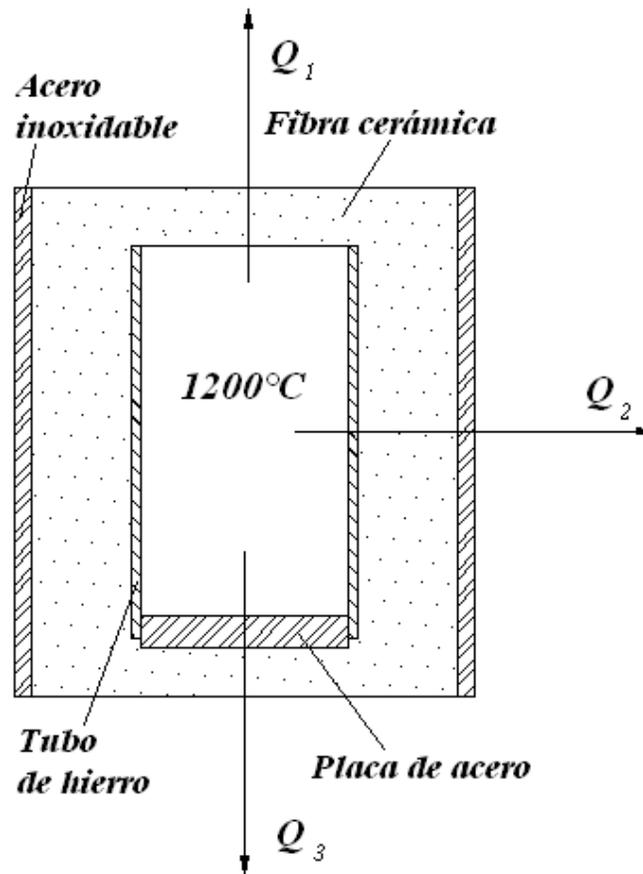


Figura 7.2.1 Representación del flujo de calor por conducción en el crisol
(Corte transversal)

Se calcula la pérdida de calor a través de la tapa del crisol Q_1 considerándola como una placa plana, teniendo los siguientes datos

Conductividad térmica de la fibra cerámica	$K_{\text{fibra cerámica}}$	0.06W/m °C
Espesor de la fibra cerámica	L	0.05m
Área de la placa	A	0.010261m ²
Temperatura del interior del crisol	T_1	1200°C
Temperatura del aire ambiente	T_2	30°C

Por medio de la ecuación

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}}$$

donde

$$R_{pared} = \frac{L}{k_{fibra} A}$$

sustituyendo valores se obtiene

$$Q_1 = 14.4062 \text{ W}$$

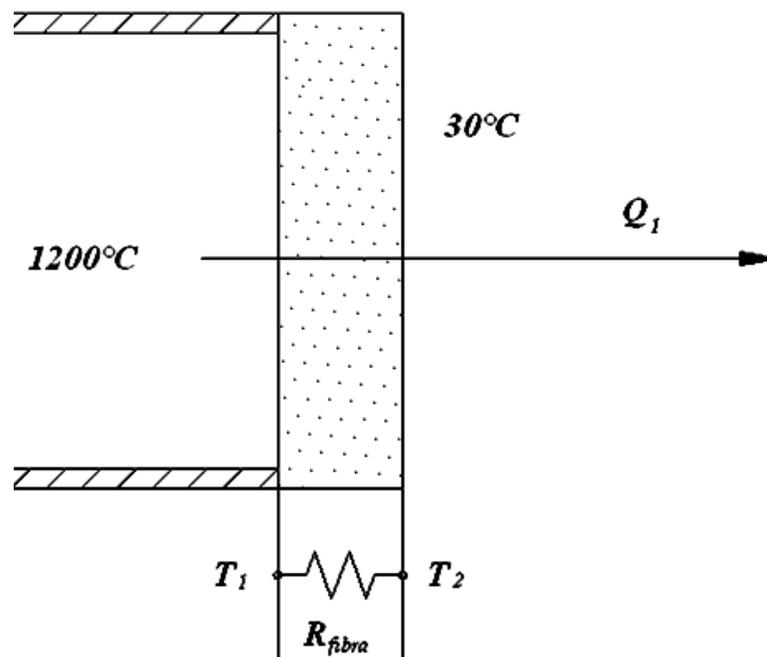


Figura 7.2.2 Esquema de la tapa del crisol.

La pérdida de calor Q_2 se obtiene mediante un análisis de un cilindro con capas múltiples en serie, como se muestra en la figura 7.2.3.

El cálculo se hace considerando el interior del cilindro como una superficie isotérmica y considerando despreciables las pérdidas de calor por convección, donde los datos más representativos de la figura y las conductividades térmicas de los materiales se muestran en la siguiente tabla:

Radio del crisol	r_2	0.05113m
Radio de la fibra cerámica	r_3	0.1325m
Radio de la lámina	r_4	0.1335m
Longitud del cilindro	L	0.198m
Conductividad del Hierro	K_{hierro}	33W/m °C
Conductividad de la fibra cerámica	$K_{fibra\ cerámica}$	0.06W/m °C
Conductividad de la lámina de acero inoxidable	$K_{acero\ inoxidable}$	19W/m °C
Temperatura de la pared interior del cilindro	T_s	1200°C
Temperatura del aire exterior	T_{∞}	30°C

r_4 corresponde al radio de la lámina inoxidable que tiene un espesor de 1 mm, los $r_{1,2}$ se obtuvieron de la tabla 3 con un diámetro nominal a 4 pulgadas.

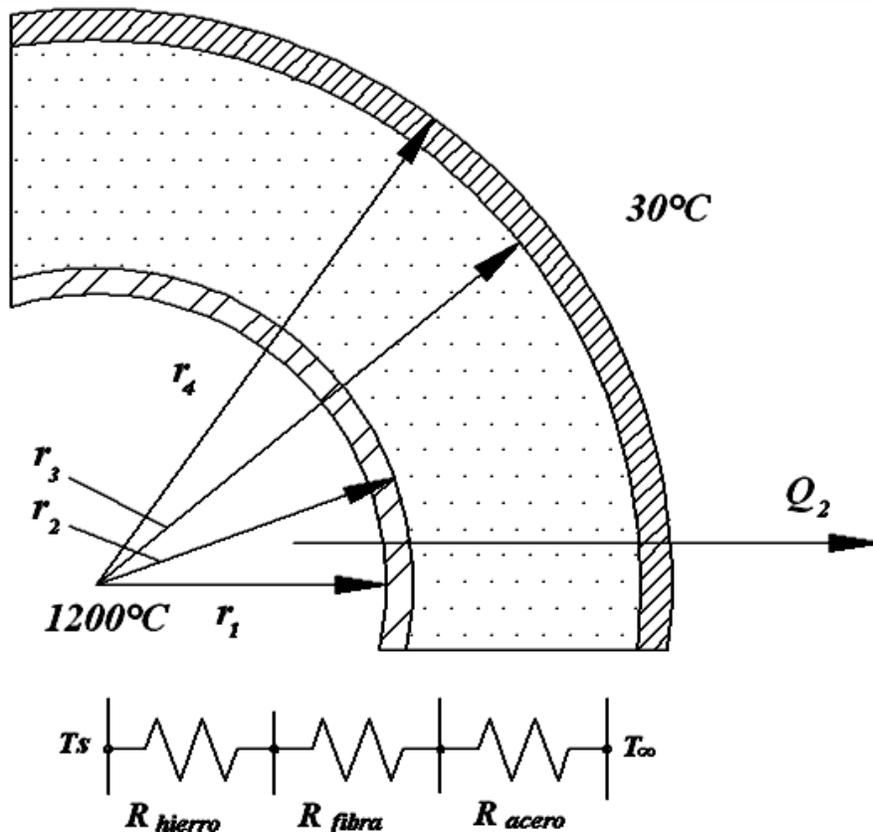


Figura 7.2.3 Representación de la red de resistencias térmicas para el crisol recubierto con fibra cerámica y lámina de acero inoxidable.

Por la ecuación

$$Q_{\text{cilindro}} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{\text{Total}}}$$

donde

$$R_{\text{Total}} = \left[\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_{\text{hierro}} L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_{\text{fibraceramica}} L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi K_{\text{a.inoxidable}} L} \right]$$

de tal manera que

$$Q_2 = 103.8292\text{W}$$

Por último Q_3 se obtiene con por medio del análisis a través de una placa plana con dos capas como se muestra en la figura 7.2.4.

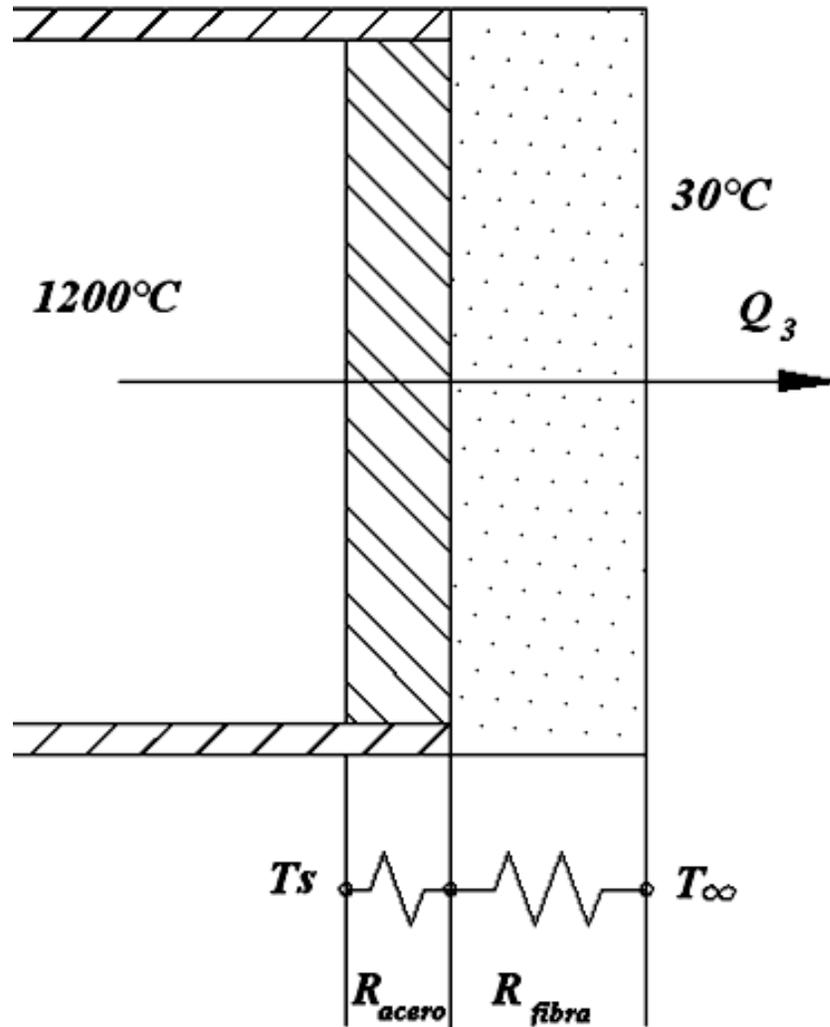


Figura 7.2.4 Esquema de la parte inferior crisol.

Con la ecuación

$$Q = \frac{T_s - T_{\infty}}{R_{\text{total}}}$$

donde

$$R_{total} = \left[\frac{L_{fibra\ cerámica}}{K_{fibra\ cerámica} A} + \frac{L_{placa\ de\ acero}}{K_{acero} A} \right]$$

donde los datos son

Espesor de la fibra cerámica	$L_{fibra\ cerámica}$	0.05m
Espesor de la placa de acero	$L_{placade\ acero}$	0.022m
Temperatura delapared interior de la placa	T_s	1200°C
Temperatura del aire exterior	T_{∞}	30°C
Conductividad térmica de la placa de acero	K_{acero}	29W/m °C
Área de la palca y fibra cerámica	A	0.010261m ²

Sustituyendo los datos anteriores obtenemos

$$Q_3 = 14.3931W$$

Las pérdidas totales por conducción son

$$Q_{conducción} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{conducción} = 132.6285 W$$

Pérdidas por convección.

La transferencia de calor por convección aparece cuando un fluido entra en contacto con la superficie de un sólido a temperatura diferente o entre diferentes partes de un fluido a diferente temperatura.

La mayor pérdida de calor por convección en el sistema se da en el orificio de la entrada de radiación, ya que ésta no se encuentra aislada y queda expuesta a las corrientes de aire del exterior.

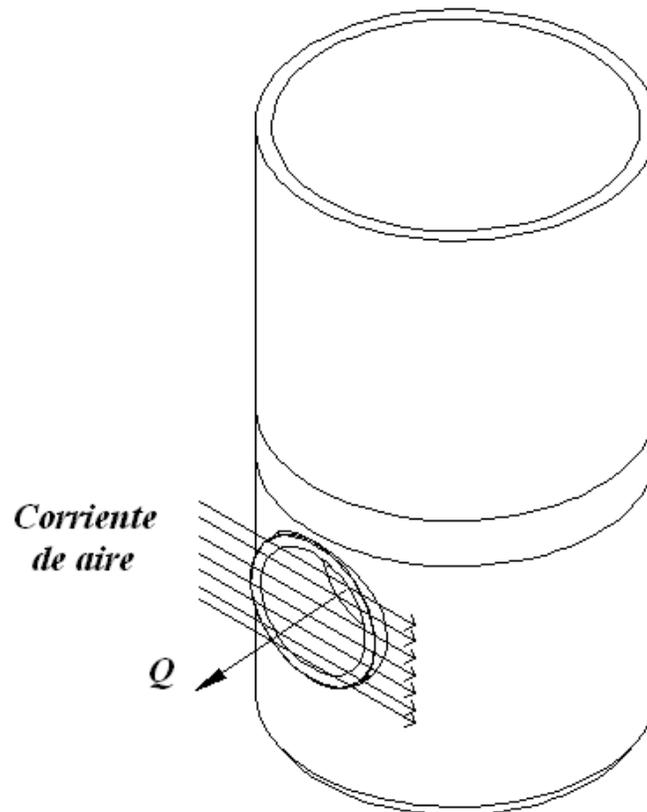


Figura 7.2.4 Representación del flujo de calor por convección y corriente de aire. Las direcciones mostradas son solo estimativas.

A 1200 °C, pero a una temperatura de película de 615 °C las propiedades del aire (obtenidas por interpolación) y condiciones como velocidad del viento y temperatura ambiente, así como el diámetro de la placa y área de ésta, se reportan en la siguiente tabla:

Conductividad térmica del aire	K_{aire}	0.06166 W/m°C
Viscosidad cinemática	ν	$9.7872 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Número Prandtl	Pr	0.7045
Velocidad del viento	V	1.7361 m/s
Diámetro de placa	D	0.048 m
Área de la placa	A	$1.81 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Cte. Stefan-Boltzmann	σ	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2\text{K}^4$
Temperatura de placa	T_s	1200 °C
Temperatura del aire	T_∞	30 °C
Temperatura de película	T_f	615 °C

donde el diámetro es igual al tamaño del agujero del crisol por donde entra la radiación.

La temperatura de película T_f se obtiene de la ecuación

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2}$$

$$T_f = 615 \text{ °C}$$

Para calcular el número de Reynolds a las condiciones establecidas, se sustituyen los datos obtenidos en la ecuación

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\gamma}$$

y se obtiene

$$Re = 851.4468$$

Conociendo los números Reynolds y Prandtl obtenemos el número de Nusselt promedio, mediante

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \text{ ya que } Re_L < 5 \times 10^5$$

$$Nu = 17.2401$$

De la misma ecuación se despeja h , donde $L=D$, sustituyendo datos

$$h = \frac{k}{L} Nu$$

$$h = 22.1464 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

se calculan las pérdidas por convección mediante la ecuación del enfriamiento de Newton

$$Q = hA(T_s - T_\infty)$$

resultando

$$Q_{convección} = 46.8735 \text{ W}$$

Pérdidas por radiación.

La radiación es el modo en que la energía se transmite en el vacío y en los cuerpos transparentes en forma de ondas electromagnéticas. Cualquier cuerpo por el hecho de estar a una temperatura por encima del cero absoluto emite energía en forma de radiación.

Las pérdidas por radiación se calculan por medio de la ley de Stefan-Boltzmann para la radiación del cuerpo negro.

$$E_b = \sigma T^4$$

en este caso tenemos

$$Q_{radiación} = e\sigma A(T_s - T_\infty)$$

donde la emisividad e para un cuerpo negro es $e = 1$ y σ es la constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2\text{K}^4$$

$$Q_{\text{radiación}} = 482.0081 \text{ W}$$

7.3 BALANCE ENERGÉTICO.

Ahora se aplica un balance de energía para determinar cuál es el calor útil disponible en el absorbedor, así como la temperatura de estancamiento del sistema, que es aquella en la que el sistema llega al equilibrio térmico, es decir, la energía útil proporcionada por el reflector es igual a la energía que se pierde por conducción, convección y radiación, es decir, la temperatura máxima que puede alcanzar el sistema de fundición.

La ecuación del balance de energía es

$$Q_u = Q_{\text{abs}} - Q_{\text{per}} = Q_{\text{abs}} - U(T_{\text{abs}} - T_a) A_r$$

Teniendo como datos

Reflectancia del reflector	ρ_R	0.95
Radiación solar directa	I_d	932.919 W/m ²
Área de apertura	A_a	4.6568 m ²
Absortancia del hierro	A	0.8
Eficiencia óptica del reflector	η_o	0.95

el flujo de calor en el reflector es

$$Q_R = A_a \rho_R I_d \alpha$$

$$Q_R = 4127.1963 \text{ W}$$

y la cantidad de calor que llega al absorbedor es

$$Q_{abs} = \eta_o A_a I_d$$

$$Q_{abs} = 3301.757 \text{ W}$$

Tenemos que las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación son

$$Q_{conducción} = 132.6285 \text{ W}$$

$$Q_{convección} = 46.8735 \text{ W}$$

$$Q_{radiación} = 482.0081 \text{ W}$$

Por medio del balance energético tenemos que el calor útil en el absorbedor es

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{per} = Q_{abs} - U(T_{abs} - T_a) A_r$$

$$Q_u = 2640.247 \text{ W}$$

Siguiendo la misma analogía anterior y haciendo cálculos sucesivos se determinó que la *temperatura de estancamiento es de 2051.75°C*, a la cual un balance de energía muestra que

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{per} = 0$$

$$Q_u = 3301.757 - 3301.757$$
$$Q_u = 0W$$

La eficiencia instantánea del concentrador es

$$\eta_c = \frac{Q_u}{I_d A_a}$$

$$\eta_c = 60.77\% \approx 61\%$$

Capítulo 8

CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

8.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN.

Construcción, aquel proceso que supone el armado de cualquier cosa, Montaje, fabricación, instalación, remodelación, demolición o eliminación de cualquier estructura, instalación o construcción adicional.

Como se podrá observar la definición de construcción abarca, el armado y todo lo que implica este proceso hasta la remodelación y/o mantenimiento que se realice a una entidad física.

Esta parte del capítulo se enfocará en la explicación del proceso de fabricación de las piezas utilizadas en el sistema de Fundición solar así como el mantenimiento que se realizó a algunas partes estructurales y piezas con las que ya se contaba al inicio de la realización de esta tesis.

Comenzaremos a dar una breve descripción general del sistema mostrado en la figura 8.1.1.

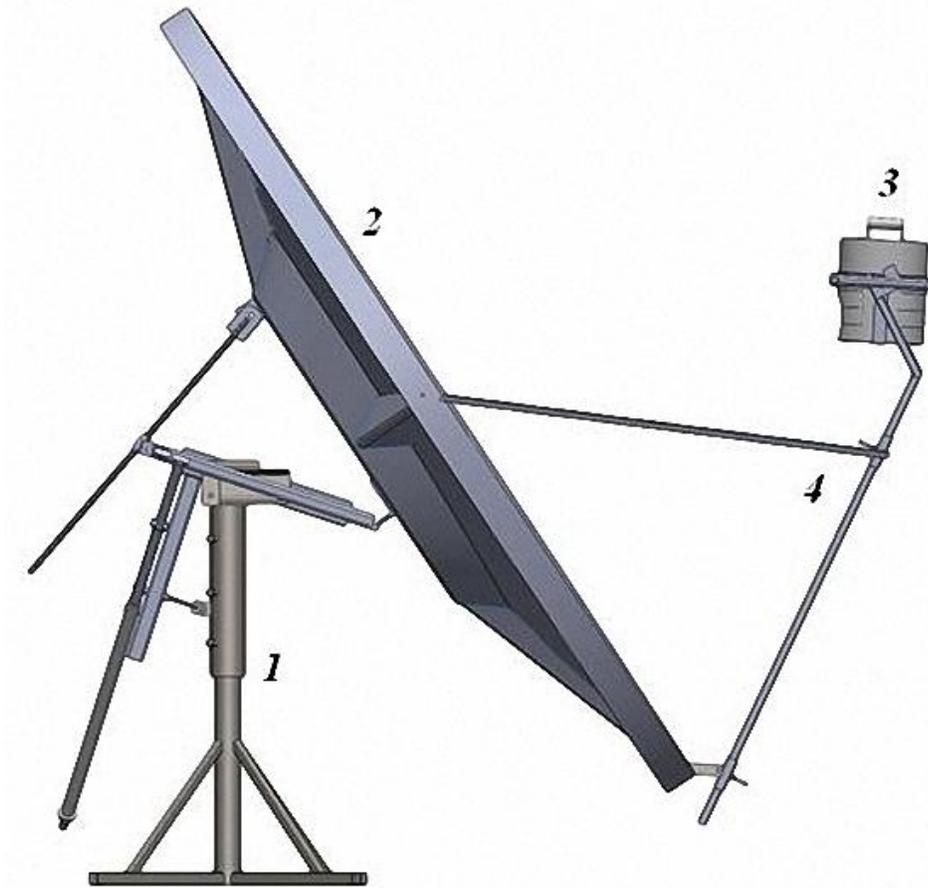


Figura 8.1.1 Representación gráfica del horno de fundición solar.

El sistema de fundición solar está formado en su conjunto por:

1. **Base de seguimiento solar:** Es el mecanismo que nos permite seguir al Sol de forma precisa y en la que se monta el concentrador o reflector y el absorbedor o receptor, ésta base es de tipo polar, que nos permite la rotación sobre un eje vertical y una inclinación sobre un eje horizontal. Es de importancia señalar que la base está diseñada para soportar todos los ángulos solares básicos y derivados.
2. **Concentrador o reflector:** Es la parte del sistema que dirige la radiación directa hacia el receptor o absorbedor.

3. Receptor o absorbedor: Es el elemento del sistema en el que la radiación proveniente del concentrador es absorbida. En el sistema de fundición corresponde al crisol.

4. Tirantes de sujeción: Son los elementos que nos permiten posicionar el absorbedor en el punto focal.

Como se puede observar el sistema consta de una antena parabólica offset (de foco descentrado) la cual fue recubierta con un material reflejante metalizado, dicha antena está montada en un sistema de seguimiento polar manual fabricada con diferentes tipos de estructuras como son, solera, ángulos, tubería de sección cuadrada así como de sección circular.

Se utilizó soldadura para hacer la unión de sus componentes fijos y tornillería para la unión de componentes móviles.

Algunas partes del sistema de fundición ya estaban construidas, como es la base de seguimiento solar, así que se procedió, en primer lugar a darle mantenimiento, es decir, desarmar, dimensionar, limpiar, engrasar y posteriormente pintarla. La figura 8.1.2 muestra el estado inicial y final de la base.

Otra de las partes de las que ya se disponía en el laboratorio de Termofluidos (LIME I) es la antena parabólica a la que posteriormente se le dio mantenimiento, se dimensionó y recubrió con material reflejante como se muestra en la figura 8.1.7.

Para la construcción del crisol se ocupó un tubo de hierro con diámetro nominal de 4 pulgadas, al cual se le soldaron dos placas de acero que sirven como fondo para contener el material fundido y como tapa del crisol.

Posteriormente se dimensionaron, recortaron y unieron las donas de fibra cerámica que servirán de aislante al crisol y finalmente se recubrió con lámina de acero inoxidable para evitar el deterioro de la fibra, como se muestra en la figura 8.1.23. La construcción de las demás partes del sistema de fundición se muestra a continuación.



Figura 8.1.2 Estado inicial en el que se encontraba la base de seguimiento solar.



Figura 8.1.3 La base de seguimiento solar después darle mantenimiento.



Figura 8.1.4 Antena parabólica offset al inicio de la tesis.



Figura 8.1.5 Antena parabólica offset después de haber limpiado la superficie.



Figura 8.1.6 Colocación del material reflejante sobre la parábola.



Figura 8.1.7 Superficie Parabólica recubierta con material reflejante.

Se recortó la fibra cerámica con la que se aisló el crisol metálico

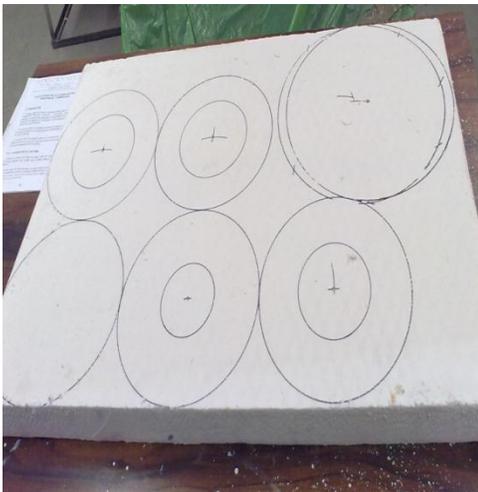


Figura 8.1.8 Dimensionamiento de los círculos de fibra cerámica.

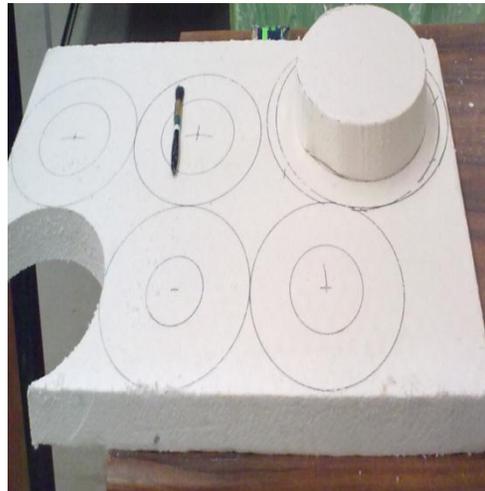


Figura 8.1.9 Primer círculo recortado.



Figura 8.1.10 Recorte de círculos de fibra cerámica para el aislamiento del crisol metálico.



Figura 8.1.11 Círculos de fibra cerámica.

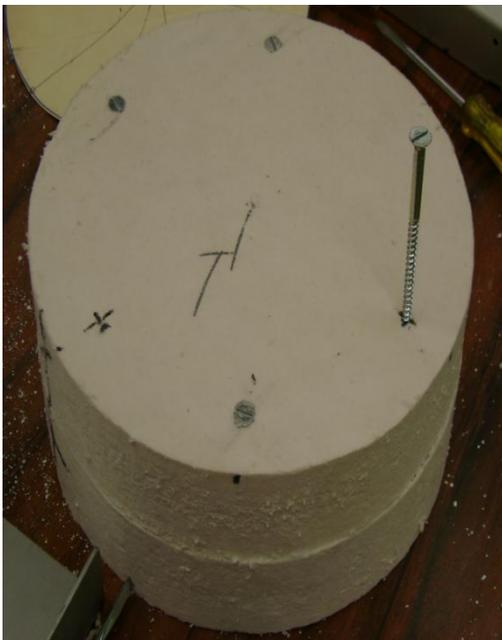


Figura 8.1.12 Unión de los círculos de fibra cerámica con pijas.



Figura 8.1.13 Aislante con tapadera para el crisol metálico.



Figura 8.1.14 Recorte para la entrada de radiación.



Figura 8.1.15 Entrada de radiación.



Figura 8.1.16 Lámina para forrar la fibra cerámica del crisol.



Figura 8.1.17 recorte de las tapas de los cilindros de lámina.



Figura 8.1.18 Corte para realizar ceja para fijación.



Figura 8.1.19 Tapadera de cilindros de lámina.



Figura 8.1.20 Lámina rolada para forrar la fibra cerámica.



Figura 8.1.21 Fibra recubierta de lámina con corte para la entrada de radiación.



Figura 8.1.22 Tapadera del crisol forrada con lámina.



Figura 8.1.23 Crisol terminado, forrado con fibra cerámica y recubierto con lámina de acero inoxidable



Figura 8.1.24 Cincho que sujetará al crisol.



Figura 8.1.25 Agarradera que se soldará en el porta crisol.



Figura 8.1.26 Porta crisol soldado.



Figura 8.1.27 Porta crisol terminado.



Figura 8.1.28 U de sujeción.



Figura 8.1.29 Colocación de la U de sujeción.



Figura 8.1.30 Pieza que se atornilla a la antena para detener la U de sujeción.



Figura 8.1.32 Crisol utilizado para la fundición.



Figura 8.1.31 Correderas que sirven de prisioneros para colocar el crisol en el punto focal



Figura 8.1.33 Crisol montado en el porta crisol



Figura 8.1.34 Horno de fundicion solar.

8.2 PRUEBAS Y RESULTADOS.

La prueba de fundición solar se realizó el 4 de abril de 2011 en un intervalo de tiempo de 10 de la mañana a 2:30 de la tarde, el metal a fundir fue aluminio que funde a los 660°C aproximadamente. Se utilizó un piranómetro para tomar medidas de radiación, obteniéndose las siguientes tablas de resultados.

Lectura	Hora del día	Rad. Total mV	Rad. Difusa mV	Rad. Directa mV
1	12:25	68.25	9.28	58.97
2	12:30	68.23	9.08	59.15
3	12:35	68.12	9.04	59.08
4	12:40	68.25	9	59.25
5	12:45	67.95	9.12	58.83
6	12:50	69.35	9.15	60.2
7	12:55	68.45	9.16	59.29
8	01:00	67.98	9.19	58.79
9	01:05	68.75	9.18	59.57
10	01:10	68.15	9.31	58.84
11	01:15	67.41	9.52	57.89
12	01:20	67.49	9.52	57.97
13	01:25	69.41	9.42	59.99
14	01:30	67.31	9.16	58.15
15	01:35	67.86	8.37	59.49
16	01:40	70.39	7.82	62.57
17	01:45	71.06	7.38	63.68
18	01:50	70.87	7.21	63.66
19	01:55	71.36	7.32	64.04
20	02:00	68.32	7.75	60.57
21	02:05	69	7.9	61.1
22	02:10	70.5	7.31	63.19
23	02:15	70.43	7.36	63.07
24	02:20	68.41	7.47	60.94
25	02:25	70.4	7.35	63.05

Tabla 8.2.1 Lecturas de radiación solar en milivolts, para el 4 de abril de 2011 tomadas de las 12:25pm – 2:25pm a intervalos de 5 minutos.

Lectura	Hora del día	Rad. Total W/m ²	Rad. Difusa W/m ²	Rad. Directa W/m ²
1	12:25	1053.24	143.20	910.03
2	12:30	1052.93	140.12	912.80
3	12:35	1051.23	139.50	911.72
4	12:40	1053.24	138.88	914.35
5	12:45	1048.61	140.74	907.87
6	12:50	1070.21	141.20	929.01
7	12:55	1056.32	141.35	914.96
8	01:00	1049.07	141.82	907.25
9	01:05	1060.95	141.66	919.29
10	01:10	1051.69	143.67	908.02
11	01:15	1040.27	146.91	893.36
12	01:20	1041.51	146.91	894.59
13	01:25	1071.14	145.37	925.77
14	01:30	1038.73	141.35	897.37
15	01:35	1047.22	129.16	918.05
16	01:40	1086.26	120.67	965.58
17	01:45	1096.60	113.88	982.71
18	01:50	1093.67	111.26	982.40
19	01:55	1101.23	112.96	988.27
20	02:00	1054.32	119.59	934.72
21	02:05	1064.81	121.91	942.90
22	02:10	1087.96	112.80	975.15
23	02:15	1086.88	113.58	973.30
24	02:20	1055.70	115.27	940.43
25	02:25	1086.41	113.42	972.99
		Promedio	Promedio	Promedio
		1101.23	146.91	932.91

Tabla 8.2.2 Valores de radiación solar en W/m²

Como se puede apreciar en la figura 8.2.1 la máxima radiación para ese día se dio en un rango comprendido entre 1:25 y 2:25 de la tarde. Se obtuvo una buena cantidad de radiación directa, que es con la que trabaja el concentrador, además cabe señalar que el día en que se hizo la prueba, el cielo estaba despejado, asegurándonos esto, una buena eficiencia del concentrador.

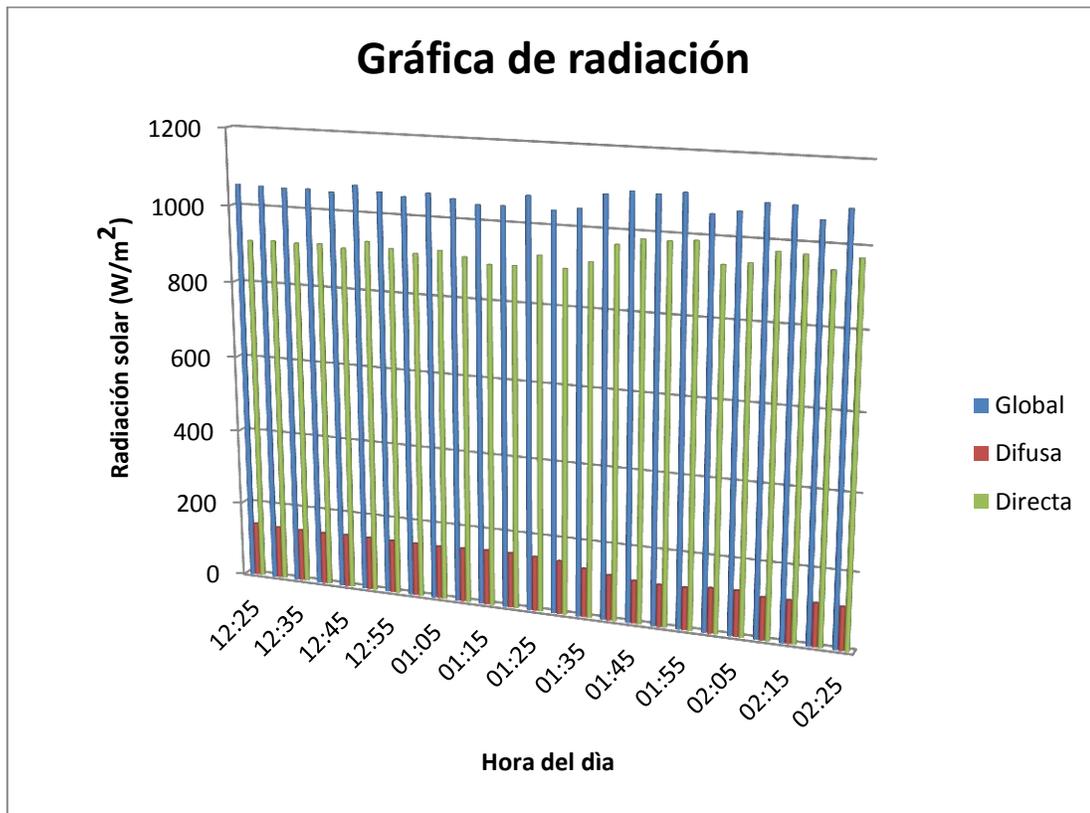


Figura 8.2.1 Gráfica de radiación solar para el 4 de abril de 2011.

TABLAS DE RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL CONCENTRADOR		
Distancia focal	f	1.47m
Diámetro de apertura	D_a	2.435m
Ángulo de borde	φ_r	79.2°
Diámetro de la mancha solar	D_r	0.0274m
Relación de concentración	C_{max}	7897.6
Temperatura máxima en el foco	T_{max}	3733.4°C

ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA		
Pérdidas por conducción	$Q_{conducción}$	132.6285 W
Pérdidas por convección	$Q_{convección}$	46.8735W
Pérdidas por radiación	$Q_{radiación}$	482.0081W
Pérdidas totales	$Q_{pérdidas}$	661.5101W
Cantidad de calor en el reflector	Q_R	2640.247W
Cantidad de calor en el absorbedor	Q_{abs}	3301.757W
Calor útil	Q_u	2640.247W
Temperatura de estancamiento	T_{max}	2051.75°C
Eficiencia instantánea del concentrador	η_c	61%

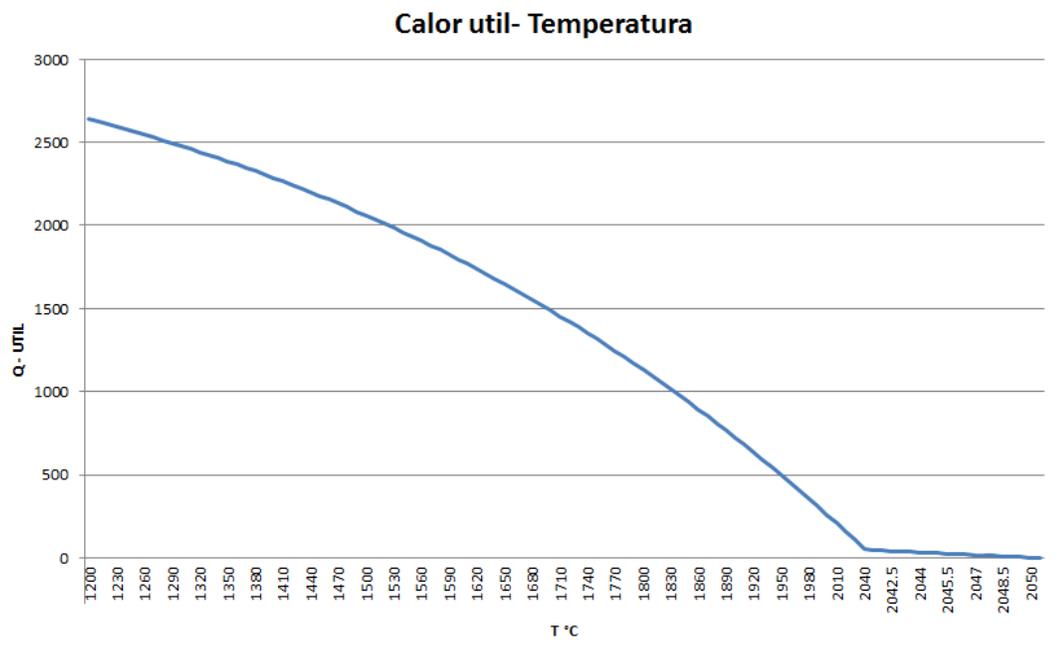


Figura 8.2.2 Gráfica en la que se representa la temperatura de estancamiento.

CONCLUSIONES

El estudio de la energía solar está adquiriendo una gran relevancia en nuestros días , aunque éste no es nada nuevo, no ha sido si no hasta épocas muy recientes que ha venido desarrollándose de una forma importante, debido a las energías fósiles que han sido durante mucho tiempo la principal fuente de energía.

Los datos acerca de la radiación incidente en México muestran que contamos con un alto potencial solar pero hay una falta de aprovechamiento de este recurso. Teniendo como las principales barreras:

Tecnológicas: la energía solar térmica, son técnicas conocidas desde hace años, en países desarrollados. Pero en México, ha sido en los últimos años cuando esta área ha empezado a experimentar un cierto crecimiento.

Educativas: el desconocimiento de la tecnología por parte de un país disminuye la demanda del uso de estos sistemas.

Políticas: ejercidas principalmente por los grandes petroleros para no utilizar las energías renovables, explotando hasta su fin las reservas de petróleo.

Como ya se ha explicado la energía solar es un tipo de energía renovable que persistirá mientras dure el Sol, y su potencia es superior a la de todas las demás energías juntas, pero presenta ciertos inconvenientes como ser una energía poco concentrada y no constante.

El sistema de fundición solar construido utiliza solo la parte directa de la radiación solar lo que requiere que el concentrador esté siempre apuntando al Sol, y que las condiciones sean adecuadas, es decir que el cielo esté despejado y sin contaminación. El diseño del sistema de fundición se basó en una antena parabólica offset ya que en este tipo de antenas la sombra del receptor queda fuera de la superficie reflectora, lo que nos permite disponer de prácticamente toda el área del reflector como superficie útil.

La relación de concentración alcanzada en el sistema es de 7897.6, la cual nos permite alcanzar una temperatura máxima de 3733°C aproximadamente.

Las altas relaciones de concentración logradas por el sistema, en el área de recepción, permiten alcanzar temperaturas mayores a los 3000°C, por lo que crisoles convencionales (de grafito) no lograron soportar estas temperaturas, y se tuvo que diseñar y construir un crisol con difusor, “para disminuir la temperatura” en el absorbedor.

Ya que anteriormente en pruebas preliminares se fundió un sensor de un termómetro de alta temperatura de Níquel y Cromo, los cuales funden a 1440°C y 1829°C respectivamente.

Para probar el sistema de fundición, se utilizó aluminio el cual fue seleccionado debido a su temperatura de fusión que se encuentra en el punto medio de la temperatura propuesta (1200°C), por su facilidad para conseguirlo y su precio relativamente bajo comparado con el de otros metales.

Con este sistema se puede fundir casi cualquier metal, pero depende del diseño del contenedor (crisol). Como éste contenedor es de acero, las temperaturas permisibles están por debajo de los 1537°C, para un funcionamiento seguro.

La operación del mismo es para metales con puntos de fusión de hasta 1200°C, por lo que se pueden fundir metales como: aluminio (660°C), antimonio (630°C), cobre (1084°C), estaño (232°C), oro (1064°C), plata (961°C), Zinc (420°C) entre otros metales.

Se puede mejorar la eficiencia del sistema, por medio de una base de seguimiento solar automática, mejorando la eficiencia óptica del reflector, y reduciendo las pérdidas de calor mediante el aislamiento correcto de la entrada de radiación.

Tabla 1. Dimensiones de tubería de acero.

Tamaño nominal de tubería, plg	Diámetro externo, plg	Cédula NO.	Espesor de pared, plg	Diámetro interno, plg	Área de sección metálica, plg ²	Área de sección transversal interna, pies ²
1/8	0.405	40	0.068	0.269	0.072	0.00040
		80	0.095	0.215	0.093	0.00025
1/4	0.540	40	0.088	0.364	0.125	0.00072
		80	0.119	0.302	0.157	0.00050
3/8	0.675	40	0.091	0.493	0.167	0.00133
		80	0.126	0.423	0.217	0.00098
1/2	0.840	40	0.109	0.622	0.250	0.00211
		80	0.147	0.546	0.320	0.00163
3/4	1.050	40	0.113	0.824	0.333	0.00371
		80	0.154	0.742	0.433	0.00300
1	1.315	40	0.133	1.049	0.494	0.00600
		80	0.179	0.957	0.639	0.00499
1 1/2	1.900	40	0.145	1.610	0.799	0.01414
		80	0.200	1.500	1.068	0.01225
		160	0.281	1.338	1.429	0.00976
2	2.375	40	0.154	2.067	1.075	0.02330
		80	0.218	1.939	1.477	0.02050
3	3.500	40	0.216	3.068	2.228	0.051300
		80	0.300	2.900	3.016	0.04587
4	4.500	40	0.237	4.026	3.173	0.08840
		80	0.337	3.826	4.407	0.07986
5	5.563	40	0.258	5.047	4.304	0.1390
		80	0.375	4.813	6.112	0.1263
		120	0.500	4.563	7.953	0.1136
		160	0.625	4.313	9.696	0.1015
6	6.625	40	0.280	6.065	5.584	0.2066
		80	0.432	5.761	8.405	0.1810
10	10.75	40	0.365	10.020	11.90	0.5475
		80	0.500	9.750	16.10	0.5185

Tabla 2. Emisividad normal total de diversas superficies

Superficie	T, °F	Emisividad ϵ
Metales y sus óxidos		
Aluminio:		
Placa muy pulida, 98.3% pura	440-1070	0.039-0.057
Hoja comercial	212	0.09
Fuertemente oxidada	299-940	0.20-0.31
Techo con revestimiento de aluminio	100	0.216
Cobre:		
Pulido	242	0.023
Placa calentada largo tiempo, cubierta con una gruesa capa de óxido	212 77	0.052 0.78
Oro puro, muy pulido	440-1160	0.018-0.035
Hierro y acero (no incluye inoxidable):		
Acero pulido	212	0.066
Hierro pulido	800-1880	0.14-0.38
Hierro colado, recientemente torneado	72	0.44
Torneado y calentado	1620-1810	0.60-0.70
Acero, suave	450-1950	0.20-0.32
Superficies oxidadas:		
Placa de hierro, en baño ácido y después oxidado al rojo	68	0.61
Hierro, superficie gris oscuro	212	0.31
Lingote tosco de hierro	1700-2040	0.87-0.95
Hoja de acero con capa gruesa de óxido	75	0.80
Plomo:		
Sin oxidar. 99.96% puro	260-440	0.057-0.075
Oxidado gris	75	0.28
Oxidado a 300 °F	390	0.63
Magnesio, óxido de magnesio	530-1520	0.55-0.20
Molibdeno		
Filamento	1340-4700	0.096-0.202
Masivo, pulido	212	0.071
Metal monel, oxidado a 1110 °F	390-1110	0.41-0.46
Níquel:		
Pulido	212	0.072
Óxido de níquel	1200-2290	0.59-0.86
Aleaciones de níquel:		
Cobre níquel, pulido	212	0.059
Alambre de micromo, brillante	120-1830	0.65-0.79
Alambre de micromo, oxidado	120-930	0.95-0.98
Platino puro, placa pulida	440-1160	0.054-0.104
Plata:		
Pulida, pura	440-1160	0.020-0.032
Pulida	100-700	0.022-0.031
Aceros inoxidables:		
Pulido	212	0.074
Tipo 301;B	450-1725	0.54-0.63

Tabla 3. Valores de propiedades para metales.

Metal	Propiedades a 20 °C				Conductividad térmica k W/ m °C									
	ρ Kg/m ³	C_P kJ/ Kg °C	K W/ m °C	α m ² /s $\times 10^5$	-100 °C	0 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C
Aluminio:														
Puro	2 707	0.896	204	8.418	215	202	206	215	228	249				
Al-Cu (Duraluminio), 94-96% Al, 3-5% Cu, con impurezas Mg	2 787	0.883	164	6.676	126	159	182	194						
Al-Si (Siluminio) contiene cobre 86.5% Al, 1% Cu	2 659	0.867	137	5.933	119	137	144	152	161					
Al-Si (Alusil), 78-80% Al, 20-22% Si	2 627	0.854	161	7.172	144	157	168	175	178					
Al-Mg-Si, 97% Al, 1% Mg, 1% Si, 1% Mn	2 707	0.892	177	7.311		175	189	204						
Plomo	11 373	0.130	35	2.343	36.9	35.	33.4	31.5	29.8					
Hierro;						1								
Puro	7 897	0.452	73	2.034	87		67	62	55	48	40	36	35	36
Hierro Forjado 0.5% C	7 849	0.46	59	1.626		73	57	52	48	45	36	33	33	33
Acero (C max \approx 1.5%):						59								
C \approx 0.5%	7 833	0.465	54	1.474			52	48	45	42	35	31	29	31
1.0%	7 801	0.473	43	1.172		55	43	42	40	36	33	29	28	29
1.5%	7 753	0.486	36	0.970		43	36	36	35	33	31	28	28	29
Acero al níquel						36								
Ni \approx 0%	7 897	0.452	73	2.026										
20%	7 933	0.46	19	0.526										

Tabla 4. Constantes físicas de los elementos principales.

	Numero atómico	Densidad [lb/in ³]	Punto de fusión [°F]	Punto de ebullición [°F]	Calor específico [BTU/lb °F]	Calor latente de fusión [BTU/lb]	Módulo de elasticidad (tensión) [lb/in ² x 10 ⁶]
Aluminio	13	0.09751	1,220.4	4,520	0.215	170	10
Antimonio	51	0.239	1,166.9	2,620	0.049	68.9	11.3
Arsénico	33	0.207	1,497	1,130	0.082	159	11
Bario	56	0.13	1,300	2,980	0.068		1.8
Berilio	4	0.0658	2,340	5,020	0.52	470	37
Bismuto	83	0.354	520.3	2,590	0.029	22.5	4.6
Boro	5	0.083	3,812	4,620	0.309		
Cadmio	48	0.313	609.6	1,409	0.055	23.8	8
Calcio	20	0.056	1,560	2,625	0.149	100	3
Carbono	6	0.0802	6,700	8,730	0.165		0.7
Cerio	58	0.25	1,460	4,380	0.042	27.2	
Cromo	24	0.260	3,350	4,500	0.11	146	36
Cobalto	27	0.32	2,723	6,420	0.099	112	30
Columbio	41	0.310	4,380	5,970	0.065		15
Cobre	29	0.324	1,981.4	4,700	0.092	91.1	16
Galio	31	0.216	85.5	3,600	0.0977	34.5	1
Germanio	32	0.192	1,756	4,890	0.086	205.7	11.4
Oro	79	0.698	1,945.4	5,380	0.031	29.0	12
Indio	49	0.264	313.5	3,630	0.057	12.2	1.57
Hierro	26	0.284	2,802	4,960	0.108	117	28.5
Lantano	57	0.223	1,535	8,000	0.0448		5
Plomo	82	0.4097	621.3	3,160	0.031	11.3	2.6

Tabla 4. Constantes físicas de los elementos principales. (Continuación).

	Numero atómico	Densidad [lb/in ³]	Punto de fusión [°F]	Punto de ebullición [°F]	Calor específico [BTU/lb °F]	Calor latente de fusión [BTU/lb]	Módulo de elasticidad (tensión) [lb/in ² x 10 ⁶]
Níquel	28	0.322	2,651	4,950	0.105	133	30
Platino	78	0.7750	3,224.3	7,970	0.032	49	21
Potasio	19	0.031	145	1,420	0.177	26.1	0.5
Plata	47	0.379	1,760.9	4,010	0.056	45	11
Titanio	22	0.164	3,074	6,395	0.139	187	16.8
Zinc	30	0.258	787	1,663	0.092	43.3	12
Litio	3	0.019	367	2,500	0.79	286	1.7
Magnesio	12	0.0628	1,202	2,030	0.25	160	6.5
Manganeso	25	0.268	2,273	3,900	0.115	115	23

Tabla 5. Propiedades del aire.

Propiedades del aire a la presión atmosférica*.

Los valores de μ , k , c_p y Pr dependen poco de la presión y se pueden utilizar en un intervalo bastante amplio de presiones

T, K	ρ , kg/m ³	c_p , kJ/kg · °C	$\mu \times 10^5$, kg/m · s	$\nu \times 10^6$, m ² /s	k , W/m · °C	$\alpha \times 10^4$, m ² /s	Pr
100	3,6010	1,0266	0,6924	1,923	0,009246	0,02501	0,770
150	2,3675	1,0099	1,0283	4,343	0,013735	0,05745	0,753
200	1,7684	1,0061	1,3289	7,490	0,01809	0,10165	0,739
250	1,4128	1,0053	1,5990	11,31	0,02227	0,15675	0,722
300	1,1774	1,0057	1,8462	15,69	0,02624	0,22160	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,2983	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,4222	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,34	0,04360	0,6532	0,680
600	0,5879	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,7512	0,680
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,8578	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05230	0,9672	0,684
750	0,4709	1,0856	3,481	73,91	0,05509	1,0774	0,686
800	0,4405	1,0978	3,625	82,29	0,05779	1,1951	0,689
850	0,4149	1,1095	3,765	90,75	0,06028	1,3097	0,692
900	0,3925	1,1212	3,899	99,3	0,06279	1,4271	0,696
950	0,3716	1,1321	4,023	108,2	0,06525	1,5510	0,699
1.000	0,3524	1,1417	4,152	117,8	0,06752	1,6779	0,702
1.100	0,3204	1,160	4,44	138,6	0,0732	1,969	0,704
1.200	0,2947	1,179	4,69	159,1	0,0782	2,251	0,707
1.300	0,2707	1,197	4,93	182,1	0,0837	2,583	0,705
1.400	0,2515	1,214	5,17	205,5	0,0891	2,920	0,705
1.500	0,2355	1,230	5,40	229,1	0,0946	3,262	0,705
1.600	0,2211	1,248	5,63	254,5	0,100	3,609	0,705
1.700	0,2082	1,267	5,85	280,5	0,105	3,977	0,705
1.800	0,1970	1,287	6,07	308,1	0,111	4,379	0,704
1.900	0,1858	1,309	6,29	338,5	0,117	4,811	0,704
2.000	0,1762	1,338	6,50	369,0	0,124	5,260	0,702
2.100	0,1682	1,372	6,72	399,6	0,131	5,715	0,700
2.200	0,1602	1,419	6,93	432,6	0,139	6,120	0,707
2.300	0,1538	1,482	7,14	464,0	0,149	6,540	0,710
2.400	0,1458	1,574	7,35	504,0	0,161	7,020	0,718
2.500	0,1394	1,688	7,57	543,5	0,175	7,441	0,730

* De Natl. Bur. Stand. (U.S.) Circ. 564, 1955.

BIBLIOGRAFÍA

Charles H. Lehmann, "*Geometría analítica*", Limusa.

Duffie, J. A. and Beckman, W. A., "*Solar Engineering of Thermal Processes*", Wiley-Interscience.

Donald Q. Kern, "*Procesos de transferencia de calor*", Continental.

Donald R. Askeland, "*Ciencia e Ingeniería de los Materiales*". International Thomson Editores.

Frank P. Incropera, David P. De Witt, "*Fundamentos de Transferencia de Calor*", Pearson.

Frank Kreith, "*Principios de transferencia de calor*", Herrero Hermanos.

Hans Rau, "*Energía Solar: Aplicaciones Prácticas*", Marcombo.

Iain Nicolson, "*El Sol*", Hermann Blume.

J. P. Holman, "*Transferencia de Calor*", Continental, México.

James R. Welty, Charles E. Wicks, Robert E. Wilson "*Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*". LIMUSA

José A. Manrique, "*Energía Solar: Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*", Harla.

J. Glynn Henry y Gary W. Heinke, "*Ingeniería Ambiental*", Prentice Hall.

Javier A. Otaola, Blanca Mendoza y Román Pérez, "El sol y la tierra: Una relación tormentosa", SEP FCE.

Kalogirou, Soteris. *“Solar energy engineering: processes and systems”*, Elsevier.

L. S. Marks, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, McGRAW-HILL.

Mikell P. Groover, *“Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas”*, Prentice Hall.

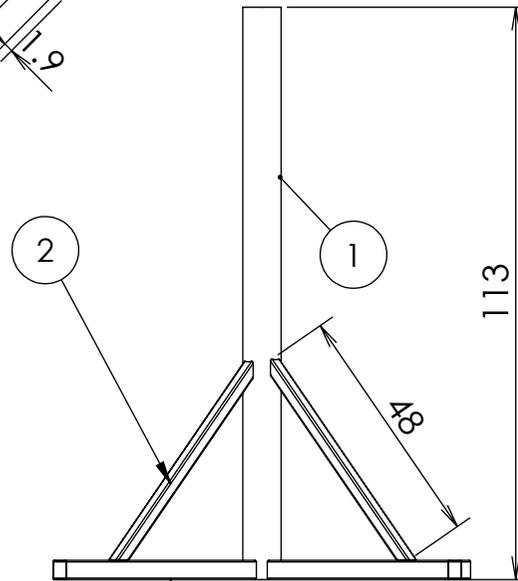
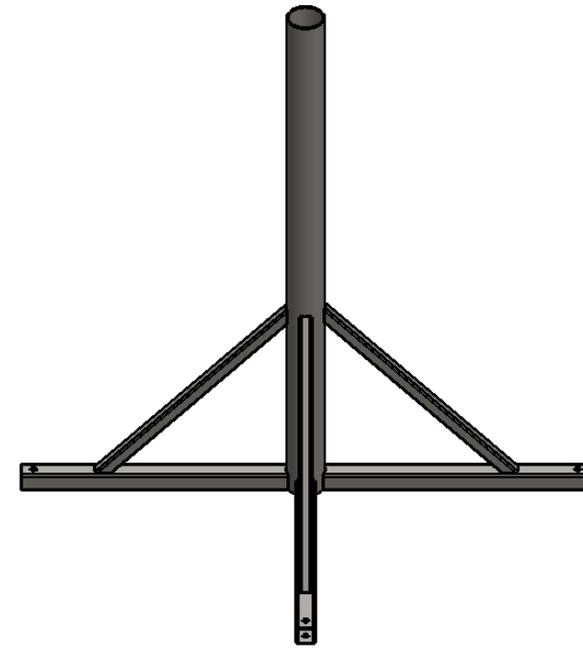
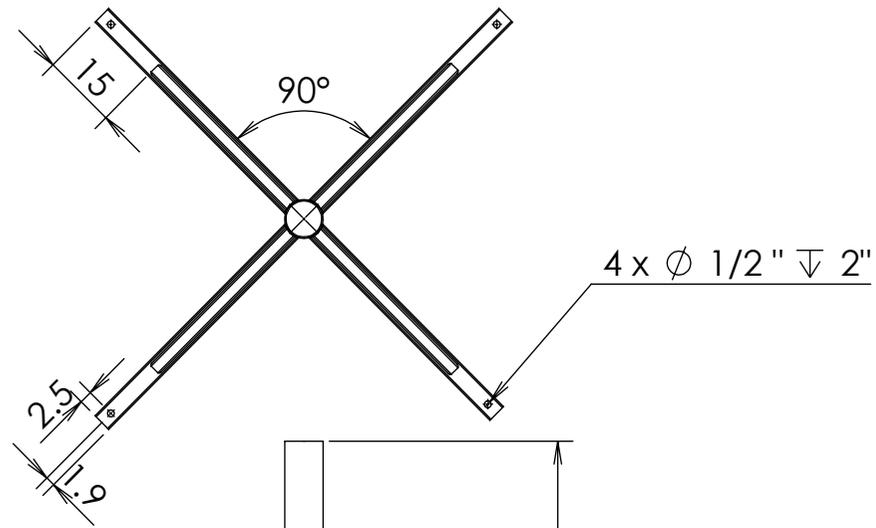
O. Levenspiel, *“Flujo de fluidos e intercambio de calor”*, Reverte.

Rabi, A., *“Optical and Thermal Analysis of Collectors”*, Paper presented at *Solar Thermal Concentrating Collector Technology Symposium*.

Richard A. Flinn, Paul K. Trojan, *“Materiales de ingeniería y sus aplicaciones”*, McGraw Hill.

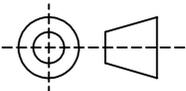
Yunus A. Cengel, *“Transferencia de calor”*, McGraw Hill.

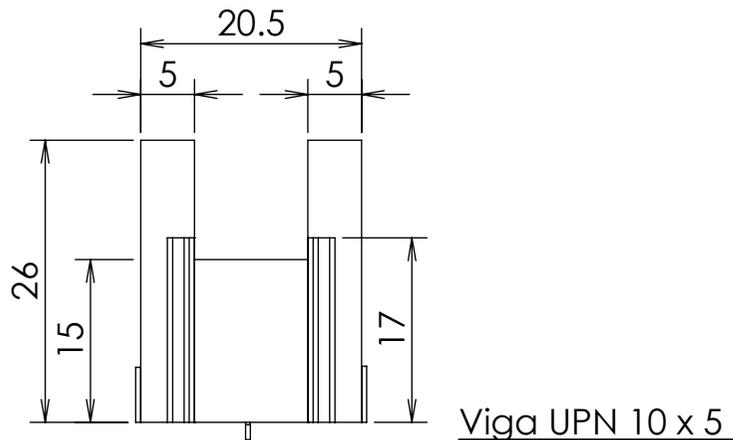
Yunus A. Cengel, *“Termodinámica”*, McGraw Hill.



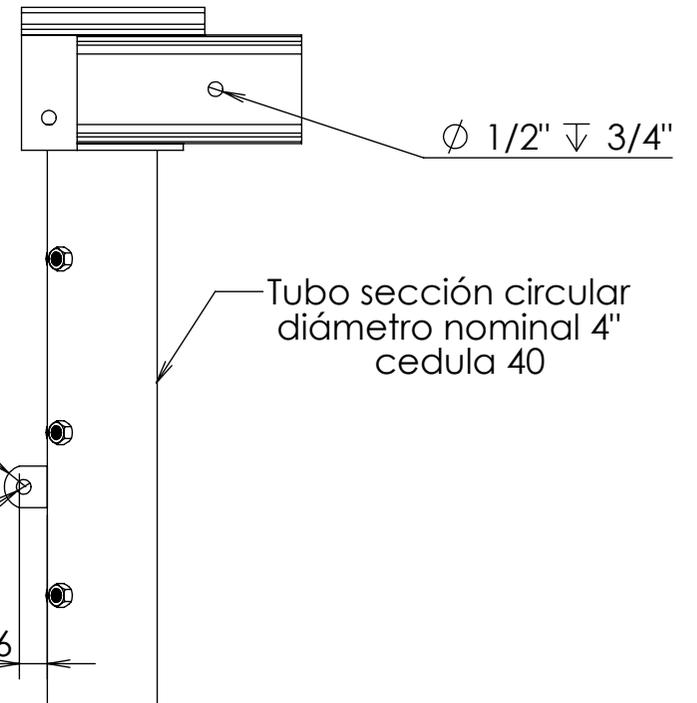
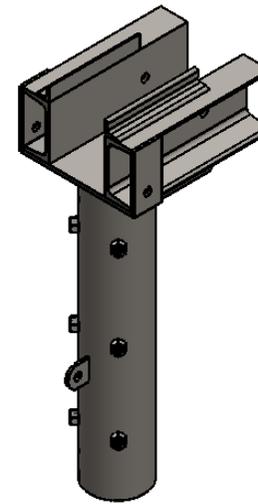
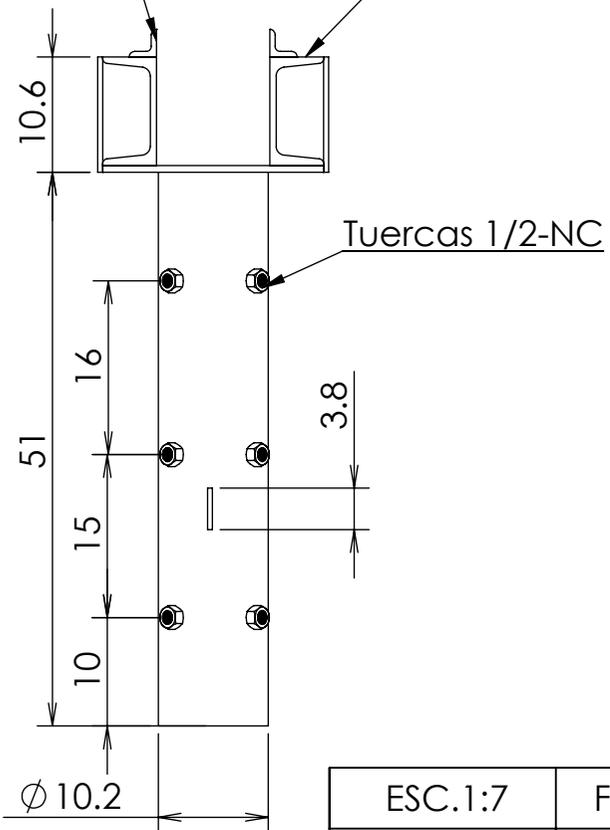
3

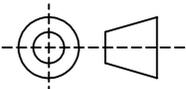
LISTA DE CORTES PARA PIEZAS SOLDADAS			
NUMERO DE ELEMENTO	CANTIDAD	DESCRIPCION	LONGITUD
1	1	Tubo sección circular diametro nominal 2 1/2 " cedula 40	113
2	4	Tubo sección cuadrada 1 " con espesor 1/8"	48
3	4	Tubo sección cuadrada 1 1/2 pulgadas con espesor 1/8"	53

ESC.1:15	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundación Solar
Acot:cm	<h1>Base Inferior</h1>		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			<h2>No.1</h2>

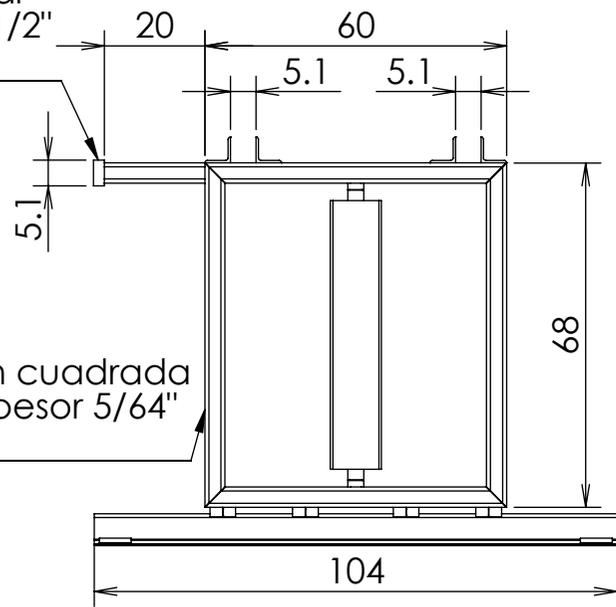


Sección angular de 1 1/2"

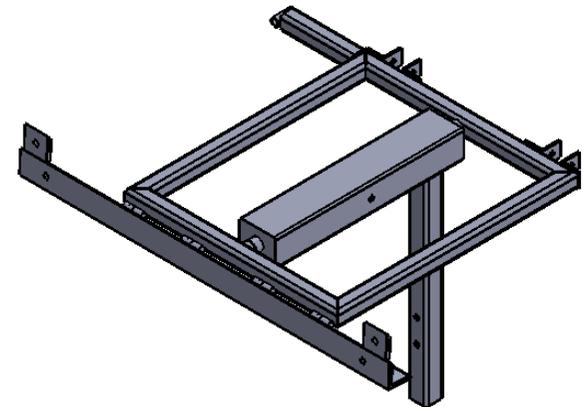


ESC.1:7	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundición Solar
Acot:cm	BASE GIRATORIA		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			No.2

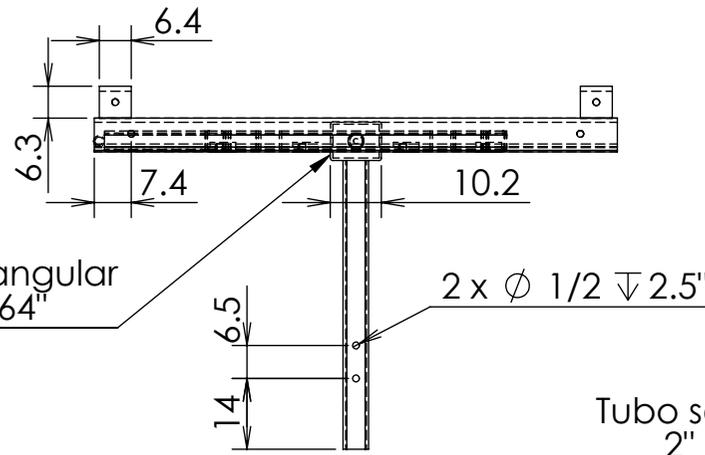
Tubo sección circular
diámetro nominal 1/2"
cedula 40



Tubo sección cuadrada
1 1/2" espesor 5/64"

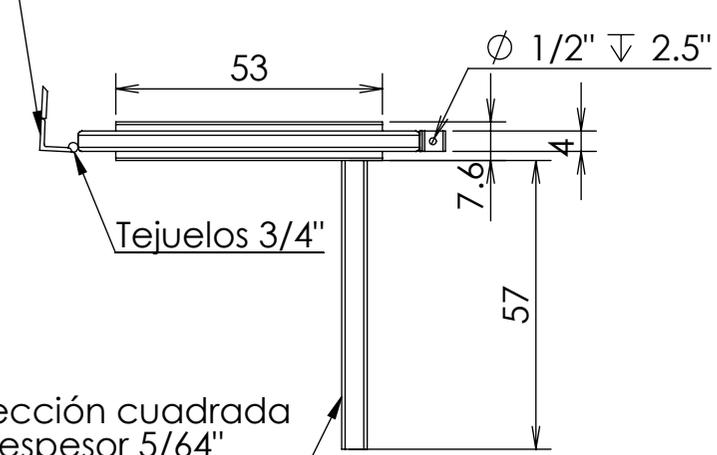


Tubo sección rectangular
3" X 4" espesor 5/64"



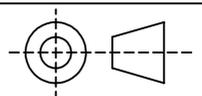
2 x ϕ 1/2 ∇ 2.5"

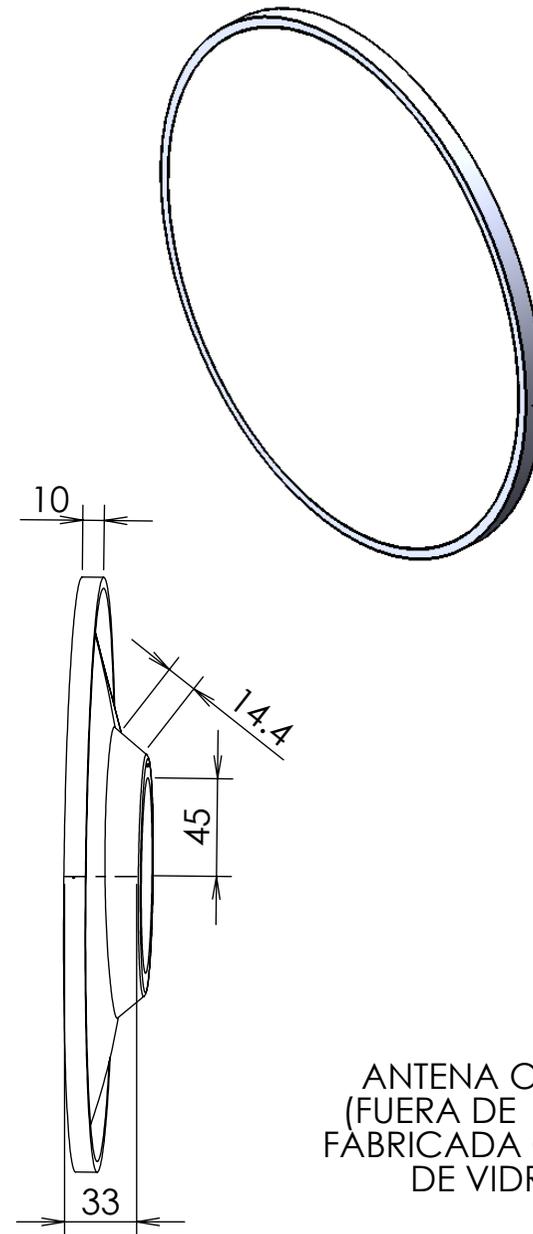
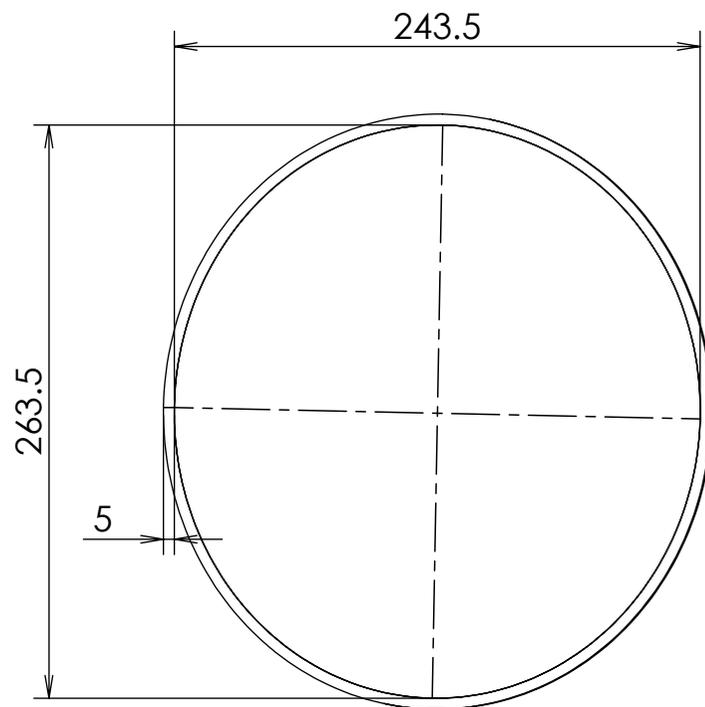
Angulo 5/16" X 2 1/2"



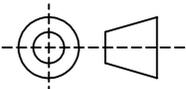
Tejuelos 3/4"

Tubo sección cuadrada
2" espesor 5/64"

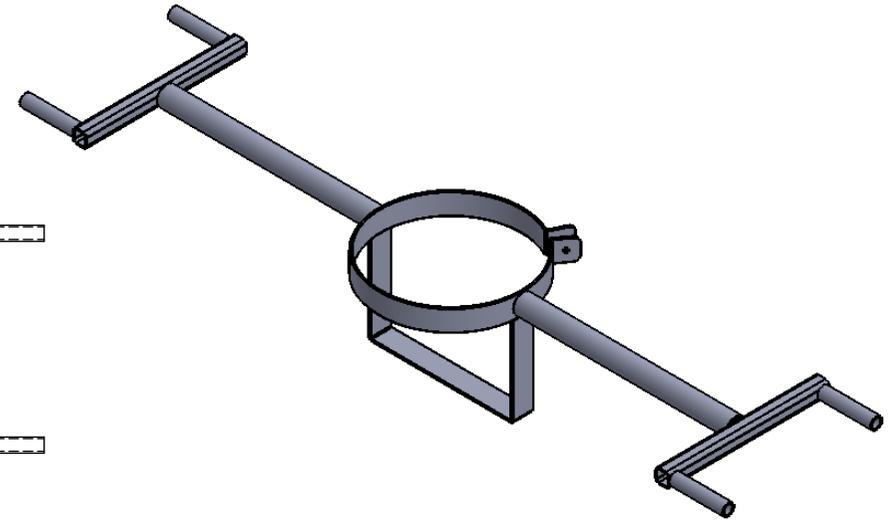
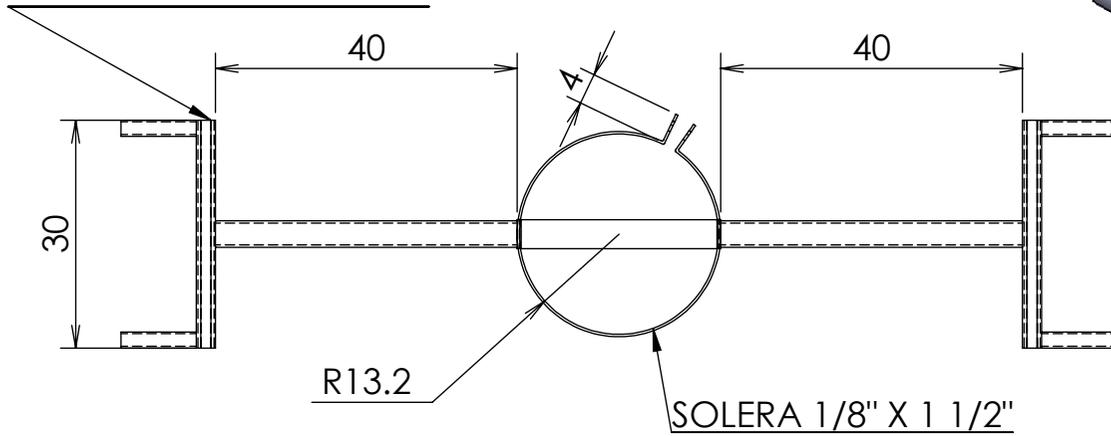
ESC.1:15	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundación Solar
Acot:cm	<h1>CUADRADO</h1>		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			<h2>No.3</h2>



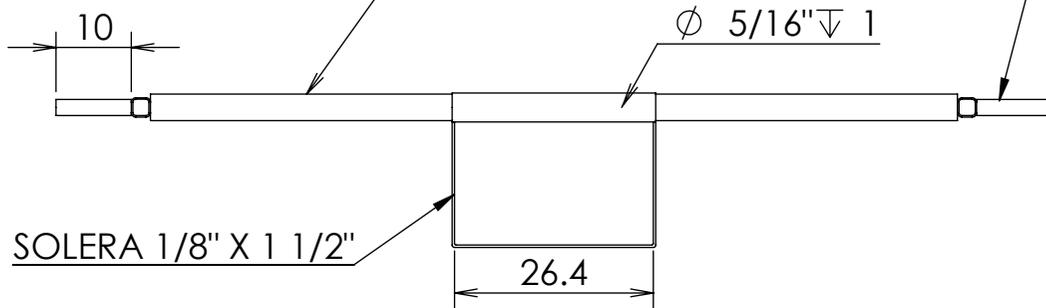
ANTENA OFFSET
(FUERA DE FOCO)
FABRICADA CON FIBRA
DE VIDRIO.

ESC.1:35	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundación Solar
Acot:cm	ANTENA OFFSET		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			No.4

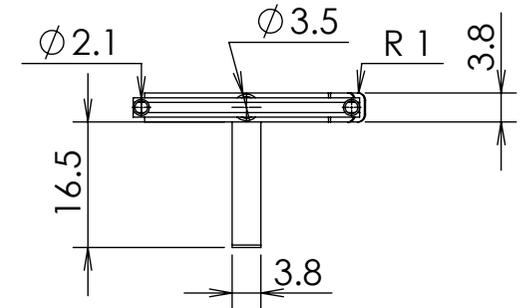
Tubo sección cuadrada
1" espesor 5/64"



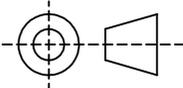
Tubo sección circular
diámetro nominal 1 1/4"
cedula 40

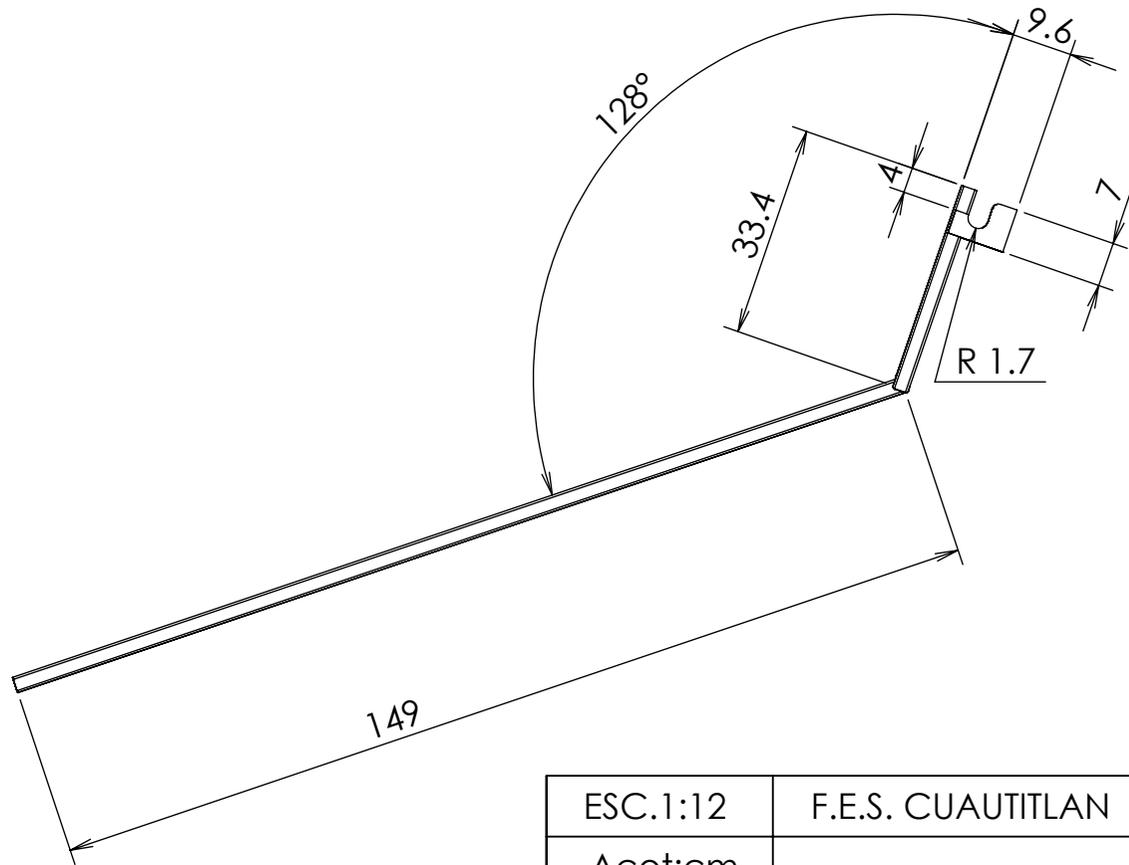
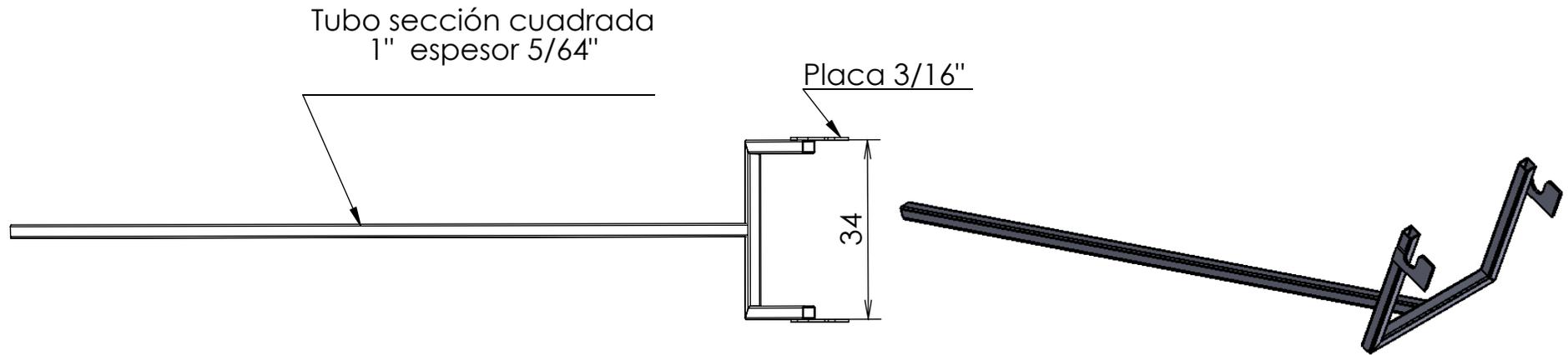


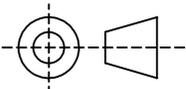
Tubo sección circular
diámetro nominal 1/2"
cedula 40

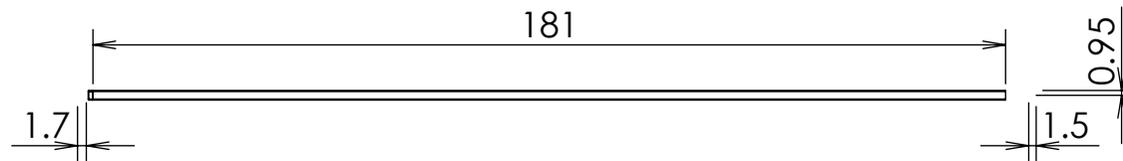
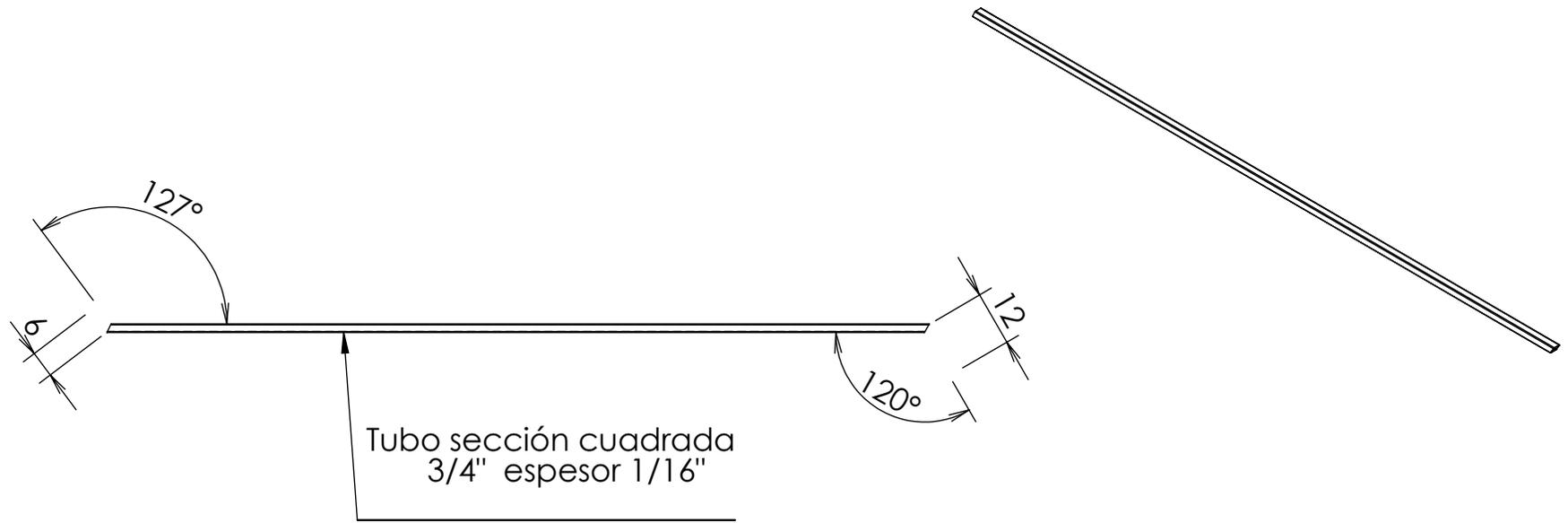


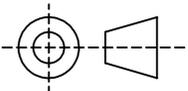
ESC.1:5

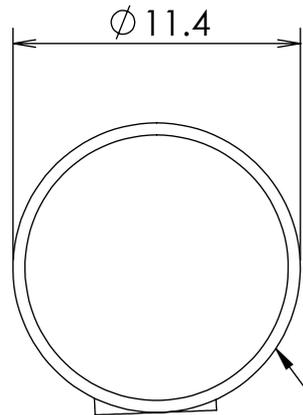
ESC.1:10	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundición Solar
Acot:cm	<h1>PORTA CRISOL</h1>		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			<h2>No.5</h2>



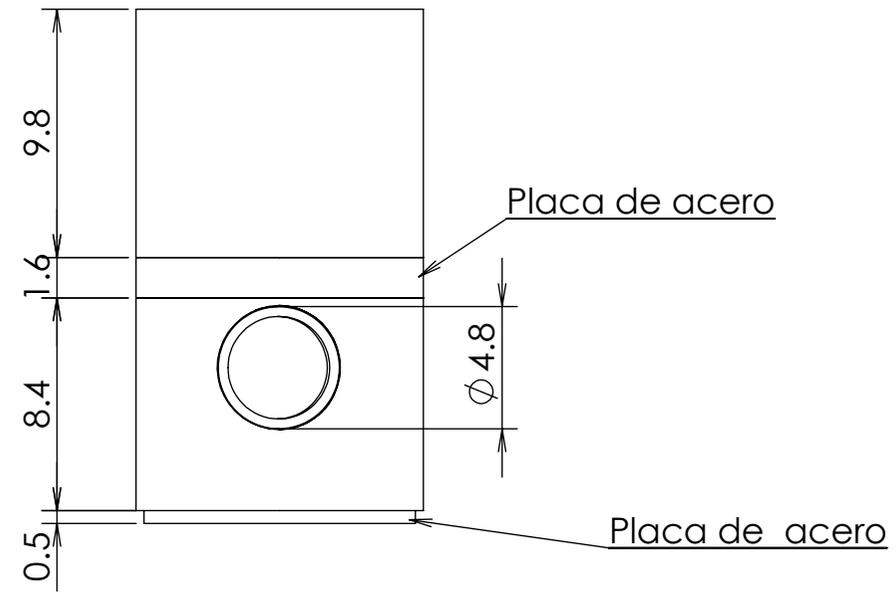
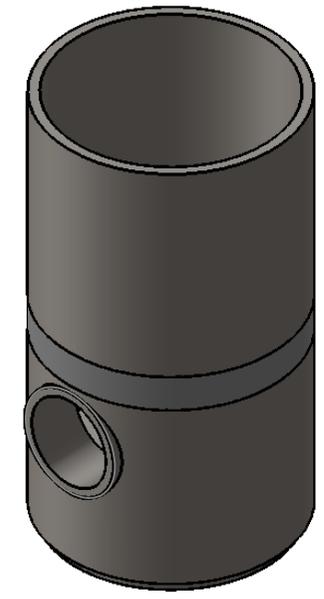
ESC.1:12	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundación Solar
Acot:cm	<h1>U DE SUJECIÓN</h1>		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			<h2>No.6</h2>

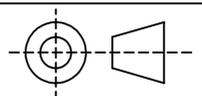


ESC.1:15	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundición Solar
Acot:cm	TIRANTE		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			No.7

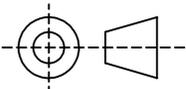


Tubo sección circular
diámetro nominal 4"
cedula 40



ESC.1:3	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundación Solar
Acot:cm	<h1>CRISOL</h1>		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			<h2>No.8</h2>



ESC.1:20	F.E.S. CUAUTILAN U.N.A.M.	13/04/2011	Tesis Fundación Solar
Acot:cm	<h1>HORNO SOLAR</h1>		Rev. Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez
			<h2>No.9</h2>