

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERIA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN ENERGÍA



INFORME DE TESIS

**“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN TUBO DE
VACÍO DE BAJA PRESIÓN Y ALTA PRESIÓN DE UN
COLECTOR SOLAR”**

**INFORME PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA**

AUTORES:

Bach. RONDAN MORALES IVAN KLEINER
Bach. REBAZA MARIÑOS RAISA ELIZABETH

ASESOR:

Lic. FRANCISCO RISCO FRANCO

NUEVO CHIMBOTE, JULIO DE 2016

ÍNDICE

HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR.....	i
HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
I. INTRODUCCION.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e importancia.....	3
1.3. Lugar e Institución donde se realizó el proyecto.....	4
1.4. Formulación del problema.....	4
1.5. Formulación de la hipótesis.....	4
1.6. Objetivos.....	4
1.6.1. Objetivo general.....	4
1.6.2. Objetivos específicos.....	4
II. MARCO TEORICO.....	5
2.1. Radiación solar.....	5
2.1.1. El Sol.....	5
2.1.2. La constante solar.....	8
2.1.3. Distribución espectral de la radiación extraterrestre.....	10
2.1.4. Variación de la radiación extraterrestre.....	12
2.1.5. Definiciones.....	14
2.1.5.1. Masa de aire.....	14
2.1.5.2. Radiación directa.....	14
2.1.5.3. Radiación difusa.....	14
2.1.5.4. Radiación solar total.....	15
2.1.5.5. Irradiancia.....	15
2.1.5.6. Irradiación o Exposición Radiante.....	15
2.1.5.7. Radiosidad o Exitancia Radiante.....	16
2.1.5.8. Potencia Emisiva o Exitancia-Propia Radiante.....	16
2.1.5.9. Tiempo solar (tiempo definido por la posición del Sol).....	16
2.1.6. Dirección de la radiación directa.....	18
2.1.7. Relación de la radiación directa sobre la superficie inclinada y superficie horizontal.....	26
2.1.8. Sombreado.....	29
2.1.9. Radiación extraterrestre sobre la superficie horizontal.....	33

2.2.	Medición de la radiación solar	36
2.2.1.	Piranómetro.....	36
2.2.2.	Datos de radiación solar.....	39
2.3.	Colectores solares de tubo de vacío	41
2.3.1.	Definición.....	41
2.3.2.	Eficiencia de un colector solar	43
2.3.3.	Tipos de colectores de tubo de vacío.....	45
2.3.3.1.	Colector de baja presión o termosifón.....	45
2.3.3.2.	Colector de alta presión o de flujo indirecto o con tubo de calor	48
2.3.3.3.	Colector de flujo directo.....	52
2.3.3.4.	Colector dual o con sistema auxiliar	55
2.4.	Teoría para la determinación de la eficiencia horaria de los tubos de vacío de baja y alta presión.....	56
III.	MATERIALES, EQUIPOS Y METODOS.....	63
3.1.	Materiales.....	63
3.2.	Equipos.....	66
3.3.	Métodos.....	68
3.3.1.	Método de la investigación	68
3.3.2.	Procedimiento de la investigación	68
3.3.3.	Diseño.....	83
3.3.4.	Población y muestra.....	83
3.3.5.	Técnicas e instrumentos para obtener los datos	83
3.3.6.	Procedimiento o forma de tratamiento de la información.....	83
3.3.7.	Técnicas de procedimiento y análisis de los resultados según las definiciones y técnicas	83
IV.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	84
4.1.	Baja presión	84
4.2.	Alta presión	89
4.3.	Efecto de la radiación global sobre las temperaturas dentro del tubo	94
V.	CONCLUSIONES.....	95
VI.	RECOMENDACIONES.....	96
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	97
	SITIOS WEB.....	99

B	<i>distancia entre centros de dos tubos adyacentes (m)</i>
D_1	<i>diámetro del tubo interior de un tubo solar (m)</i>
D_2	<i>diámetro del tubo exterior o cubierta de un tubo solar (m)</i>
F_{t-s}	<i>factor de forma de la radiación difusa desde un tubo hacia la bóveda celeste (adimensional)</i>
Q_{horario}	<i>ganancia solar horaria (J/m^2)</i>
I	<i>intensidad solar instantánea (w/m^2)</i>
L	<i>longitud de tubos solares expuestos al aire ambiente (m)</i>
m	<i>masa de agua en el tanque de almacenamiento (kg)</i>
N	<i>número de tubos en un calentador de agua</i>
n	<i>número de días contados desde el 1° día de Enero; vector unitario</i>
T	<i>temperatura ($^{\circ}C$)</i>
T_i	<i>lectura la primera temperatura del sensor; temperatura inicial del agua en el tanque o tubo ($^{\circ}C$)</i>
T_f	<i>temperatura final del agua en el tanque o tubo ($^{\circ}C$)</i>
t	<i>tiempo solar; tiempo definido por la posición del Sol (s)</i>
Δt	<i>intervalo de tiempo de las mediciones (s)</i>
β	<i>ángulo de inclinación del colector desde el horizonte ($^{\circ}$)</i>
δ	<i>declinación del Sol ($^{\circ}$)</i>
φ	<i>ángulo azimut del colector ($^{\circ}$)</i>
λ	<i>latitud del sitio ($^{\circ}$)</i>
Ω	<i>ángulo formado por la proyección de los rayos solares sobre la sección transversal de los tubos y la normal de la superficie de colector ($^{\circ}$)</i>
ω	<i>ángulo horario solar (rad)</i>
θ	<i>ángulo de incidencia (rad)</i>

Subíndices

a	<i>aire ambiente</i>
b	<i>radiación directa</i>
d	<i>radiación difusa</i>
h	<i>radiación horizontal</i>
i	<i>agua de entrada de los tubos solares</i>
f	<i>agua de salida de los tubos solares</i>
s	<i>Sol</i>
t	<i>tubo solar</i>

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el título profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D. N°471-2002-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN
ENERGÍA**

**“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN TUBO DE VACÍO DE BAJA
PRESIÓN Y ALTA PRESIÓN DE UN COLECTOR SOLAR”**

TESISTAS: Bach. RONDAN MORALES IVAN KLEINER
Bach. REBAZA MARIÑOS RAISA ELIZABETH

Lic. Francisco Risco Franco
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR DE TESIS

Damos conformidad del presente estudio, desarrollado en cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al Reglamento General para Obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D. N°471-2002-CU-R-UNS) titulado:

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN
ENERGÍA**

**“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN TUBO DE VACÍO DE BAJA
PRESIÓN Y ALTA PRESIÓN DE UN COLECTOR SOLAR”**

TESISTAS: Bach. RONDAN MORALES IVAN KLEINER

Bach. REBAZA MARIÑOS RAISA ELIZABETH

Revisado y Evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:

Mg. Robert Guevara Chinchayán
Presidente

Mg. Pedro Paredes Gonzales
Integrante

Lic. Francisco Risco Franco
Integrante

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecemos a Dios por habernos guiado a lo largo de toda nuestra carrera profesional, por ser nuestra fortaleza en momentos de debilidad y por brindarnos salud y felicidad.

Damos gracias a nuestros padres Antonio y Silvia, Angela y Hernan; por apoyarnos en todo momento, por los valores que nos inculcaron y por habernos dado la oportunidad de tener educación universitaria.

Agradecemos también a nuestro asesor de tesis Francisco Risco por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como su paciencia durante el desarrollo de la tesis.

Nuestro agradecimiento también a nuestros profesores en general a quienes les debemos gran parte de nuestros conocimientos.

Nuestro agradecimiento mutuo por ser compañeros no solo de tesis sino también de vida y amor.

Y para finalizar, agradecemos a nuestros amigos quienes colaboraron en el transcurso de la tesis.

Ivan Rondan
Raisa Elizabeth

RESUMEN

El uso de tubos de vacío en colectores solares para agua caliente sanitaria, ha tenido un avance significativo en el calentamiento de agua, debido a su captación de calor en condiciones desfavorables o días de inviernos aprovechando su radiación difusa en tales días. Por su forma cilíndrica la radiación es captada más eficazmente y toleran variaciones de hasta 25° sobre la inclinación idónea sin pérdida de rendimiento; debido al vacío se eliminan las pérdidas por conducción y convección. Actualmente los costos de producción son menores a otras tecnologías. Además, evita el uso de energías tradicionales, generalmente fósiles, contribuyendo así con el medio ambiente.

El objetivo de este trabajo fue la determinación de las eficiencias para un tubo de vacío de baja presión y un tubo de vacío de alta presión. Se realizó la adecuación experimental a cada tubo de vacío, para determinar las eficiencias. Se aplicó un procedimiento para estimar la radiación horaria ganada por el tubo de vacío basado en geometría solar, transferencia de calor por radiación en 2 dimensiones y la aplicación de un método numérico de integración.

La eficiencia horaria promedio del tubo de vacío de baja presión fue de 48%, mientras que para el tubo de vacío de alta presión la eficiencia horaria fue de 46%.

Palabras clave: Tubo de Vacío, radiación directa, radiación difusa, eficiencia horaria.

ABSTRACT

The use of vacuum tubes solar collectors for domestic hot water, has had a significant advance in heating water, due to its acquisition of heat in unfavorable conditions or days of winters taking advantage of their diffuse radiation on such days. Its cylindrical shape the radiation is more effectively captured and tolerate variations of up to 25 degrees on the ideal tilt without loss of performance; due to vacuum loss are eliminated by conduction and convection. Currently the production costs are lower than other technologies. It avoids the use of traditional, usual fossil energy, thus contributing to the environment.

The objective of this work was the determination of efficiencies for a low pressure vacuum tube and a tube of high pressure vacuum. The experimental adequacy to each vacuum tube, was conducted to determine the efficiencies. Apply a procedure to estimate time radiation won by vacuum tube based solar geometry, heat transfer by radiation in 2 dimensions and application of a numerical integration method. The average time efficiency of low pressure vacuum tube was 48%, while for high pressure vacuum tube time efficiency was 46%.

Keywords: Vacuum tube, beam radiation, diffuse radiation, efficiency.

I. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

Pineda J. (2014). Concluyó que la inclinación de las superficies en Colombia no debe ser menor a 4° ni mayor a 14° . Además que aun estando el cielo nublado puede seguir operando en días de invierno, nubosos e incluso lluvia, puesto que absorben radiación difusa. Comprobó que si el calentador solar se encuentra vacío totalmente y se empieza a llenar a las 9 de la mañana, con un cielo despejado y una temperatura ambiente de 23°C , el calentador puede llegar a la temperatura máxima en menos de 4 horas.

Camargo. A (2013). Concluyó que el colector de tubos de vacío presenta mayor eficiencia térmica que los colectores de placa plana y este a su vez supera los colectores de botellas. Mas sin embargo, los costos varían de manera inversa. Con la tecnología de tubos al vacío se obtienen las mejores eficiencias y las más altas temperaturas pero con un costo elevado, además de que son de importación; mientras que el colector de botellas PET presenta modestas eficiencias y temperaturas relativamente bajas pero suficientemente alta para diversas aplicaciones.

Tang R. y otros (2011). Concluyó que el ángulo de inclinación del colector de los SWHs (calentadores solares de agua) tuvo influencia significativa sobre la radiación diaria captada y la ganancia de calor solar diario de un sistema, pero insignificante en la eliminación de calor desde los tubos solares hacia el tanque de almacenamiento y la eficiencia de conversión térmica solar diaria.

Tang R. y otros (2009). Concluyó que la radiación anual captada por unidad de longitud de un solo tubo es afectado por muchos factores, incluyendo sus parámetros estructurales tales como tipo de colector y distancia central entre tubos adyacentes, parámetros geométricos tales como el tamaño del tubo solar, ángulo de inclinación y azimut, uso de

DFR, latitud del sitio y condiciones climáticas. También que los colectores dispuestos a un ángulo de inclinación captan ligeramente más radiación que los dispuestos horizontalmente.

Flores P. (2009). Concluyó que las pérdidas por transferencia de calor de convección y radiación en tubo de vacío Heat Pipe es el 10,87 %, para las condiciones climatológicas de Arequipa.

Salguero V. (2008). Concluyó que el rendimiento promedio de colectores del 39,786 %. El rendimiento de los colectores alcanza su máximo aproximadamente entre las 10:50-16:45, con valores situados entre el 65-55 % coincidiendo con la radiación solar máxima (960 W/m²). El intervalo de temperaturas de salida del agua se encuentra entre 65 °C y 80 °C, apto para el funcionamiento de la máquina de absorción. En una vivienda de 90 m², se reduciría las emisiones de CO₂ en un 50 % respecto a los sistemas de compresión mecánica.

Placco C. y otros (2007). Concluyó que cada nuevo sistema de energía solar térmica es un paso hacia un ambiente limpio y sostenible. Una vivienda unifamiliar (2 m² de captadores) puede evitar 1,5 t de CO₂ al año. Un hotel con capacidad para 400 personas (580 m² de captadores) puede evitar 128 t de CO₂ al año. El incremento del precio de las energías convencionales impulsará el crecimiento continuo de la energía solar en todo el mundo y se anticipa un crecimiento del 30% anual.

Reig J. (2007). Concluyó que en una instalación de energía solar térmica que contemple satisfacer la demanda de ACS, calefacción y refrigeración, los años en los que se recupera la inversión inicial, es decir, el período de amortización de la instalación, es elevado dado que el ahorro anual de 484,3 € representa un 0,052 % del coste inicial del proyecto y un 0,12 % del coste de los 6 metros cuadrados de colectores solares instalados.

Fang Y. y otros (2006). Concluyó que la incertidumbre general en el coeficiente de transferencia de calor determinada de las muestras usando este calorímetro se determinó que era de menos de 8,5 %. De las dos muestras de tubo de vacío realizadas, se determinó que la primera muestra tuvo un coeficiente global de transferencia de calor de 0,97 W/m²K y para la segunda prueba de 1,06 W/m²K.

Sharma S. y otros (2005). Concluyó que el sistema es capaz de cocinar con éxito dos veces (mediodía y noche) durante un día simple en Japón en los meses de verano. En verano PCM (Phase Change Material), alcanzó temperaturas sobre los 110 °C, cocinando durante la noche. PCM es capaz de conservar temperaturas cerca a los 75 °C hasta la mañana del día siguiente.

Esen M. (2004). Concluyó que la cocina solar con tubos de vacío heat pipe no solo depende de las condiciones meteorológicas. Por lo tanto la selección del refrigerante, las condiciones meteorológicas y los parámetros constructivos de la olla deben ser considerados en conjunto.

Balzar A. y otros (1996). Concluyó que las altas temperaturas de cocción hasta aproximadamente 250 °C así como tiempos de calentamiento cortos se pueden obtener con un sistema de cocción solar formado por colectores de tubos de vacío heat pipe integrados que utilizan el agua como fluido de trabajo.

1.2. Justificación e importancia

La disminución de costes energéticos es una buena razón para utilizar energía solar térmica. Las aplicaciones térmicas conllevan una inversión inicial mayor que un sistema térmico convencional. Sin embargo, una vez instalado el sistema solar térmico, los gastos de funcionamiento son mínimos. En los sistemas que utilizan combustibles fósiles, es necesario el suministro de los mismos mediante una compra en función de las necesidades térmicas. En cambio, en la energía solar, los costes que

cubren el funcionamiento son mínimos y sólo serán necesarios para cubrir el mantenimiento, el control del sistema y su manutención. Por ello, los beneficios que aporta el sistema solar son por el ahorro en el gasto del combustible necesario.

1.3. Lugar e Institución donde se realizó el proyecto

La investigación se realizó en la Universidad Nacional del Santa del distrito de Nuevo Chimbote, provincia del Santa, departamento de Ancash, ubicado a 25 m.s.n.m.

1.4. Formulación del problema

¿Cómo se determina la eficiencia de un tubo de vacío de baja presión y alta presión de un colector solar?

1.5. Formulación de la hipótesis

La eficiencia de un tubo de vacío de baja presión y alta presión de un colector solar se determina usando una relación de balance térmico.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar la eficiencia de un tubo de vacío de baja y alta presión de un colector solar.

1.6.2. Objetivos específicos

- Elaborar el modelo físico para determinar la eficiencia de un tubo de vacío de baja presión y alta presión de un colector solar.
- Construir el sistema experimental con los tubos de vacío de un colector solar.
- Tomar datos de los diferentes ensayos.
- Determinar el calor útil y la radiación horaria.

II. MARCO TEORICO

2.1. Radiación solar

La estructura y las características del Sol determinan la naturaleza de la energía irradiada en el espacio. Esto refiere a las características de esta energía fuera de la atmosfera de la Tierra, su intensidad y su distribución espectral. Nos ocuparemos en primer lugar con la radiación en un rango de longitud de onda de $0,25$ a $3,00 \mu m$, la parte de radiación electromagnética que incluye la mayoría de la energía irradiada por el Sol. (Duffie y Beckman, 2013)

El segundo tema importante es la geometría solar, es decir, la posición del Sol en el cielo, la dirección en el cual la radiación directa incide sobre las superficies de diversas orientaciones y el sombreado. El tercer tema es la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal, que representa el límite superior teórico de la radiación solar disponible en la superficie de la Tierra. (Duffie y Beckman, 2013)

La comprensión de la naturaleza de la radiación extraterrestre, los efectos de la orientación de una superficie de recepción, y la teóricamente posible de radiación en la superficie de la Tierra es importante para comprender y utilizar datos de radiación solar. (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.1. El Sol

El Sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de $1,39 \times 10^9 m$ y está en promedio a $1,5 \times 10^{11} m$ de la Tierra. Visto desde la Tierra, el Sol gira sobre su eje una vez cada 4 semanas. Sin embargo, no gira como un cuerpo sólido; el ecuador tarda unos 27 días y las regiones polares toma alrededor de 30 días, para cada rotación. (Duffie y Beckman, 2013)

El Sol tiene una temperatura de cuerpo negro efectiva de $5777 K$. La temperatura en las regiones interiores centrales se estima en una variación entre 8×10^6 a $40 \times 10^6 K$ y la densidad se estima cerca de 100 veces la densidad del agua. En efecto, el Sol es un

reactor de fusión continua con sus gases constituyentes como el “contenido en un recipiente” retenido por las fuerzas gravitacionales. Varias reacciones de fusión se han sugerido para suministrar la energía radiada por el Sol. Considerada la más importante es un proceso en el cual el hidrogeno (es decir, cuatro protones) se combina para formar helio (es decir, el núcleo de helio uno); la masa del núcleo de helio es menor que los cuatro protones, habiéndose perdido masa en la reacción y convertido en energía. (Duffie y Beckman, 2013)

La energía producida en el interior de la esfera solar a temperatura de millones de grados debe transferirse a la superficie para luego ser irradiado en el espacio. Una sucesión de procesos radiativos y convectivos ocurre con emisión sucesiva, la absorción y la radiación de retorno; la radiación en el núcleo del Sol está en los rangos de los rayos X y gama del espectro, con aumentos de longitudes de onda de la radiación, como la temperatura desciende a mayores distancias radiales. (Duffie y Beckman, 2013)

Un esquema de la estructura del Sol es mostrado en la figura N° 1. Se estima que 90 % de la energía se genera en la región de 0 a $0,23R$ (donde R es el radio del Sol), que contiene 40 % de la masa del Sol. A una distancia de $0,7R$ del centro, la temperatura ha bajado alrededor de $130\,000\text{ K}$ y la densidad ha bajado a 70 kg/m^3 ; aquí los procesos de convección llegan a ser más importantes, la zona de $0,7R$ a $1,0R$ es conocido como **zona convectiva**. Dentro de esta zona la temperatura baja alrededor de 5000 K y la densidad a 10^{-5} kg/m^3 . (Duffie y Beckman, 2013)

La superficie del Sol parece estar compuesto de gránulos (células de convección irregular), con dimensiones desde $1\,000$ a $3\,000\text{ km}$ y con una vida útil de células de unos pocos minutos. Otra de las características de la superficie solar, son pequeñas áreas oscuras llamados poros, que son del mismo orden de magnitud como las células convectivas y grandes áreas oscuras llamadas manchas solares, los cuales varían en tamaño. La capa externa de la zona

convectiva se llama la **fotosfera**. El borde de la fotosfera está claramente definido, aunque es de baja densidad (aproximadamente de 10^{-4} que la del aire al nivel del mar). Es esencialmente opaca, ya que los gases de las que se compone están fuertemente ionizados y capaces de emitir y absorber un espectro continuo de la radiación. La fotosfera es la fuente de la mayor parte de la radiación solar. (Duffie y Beckman, 2013)

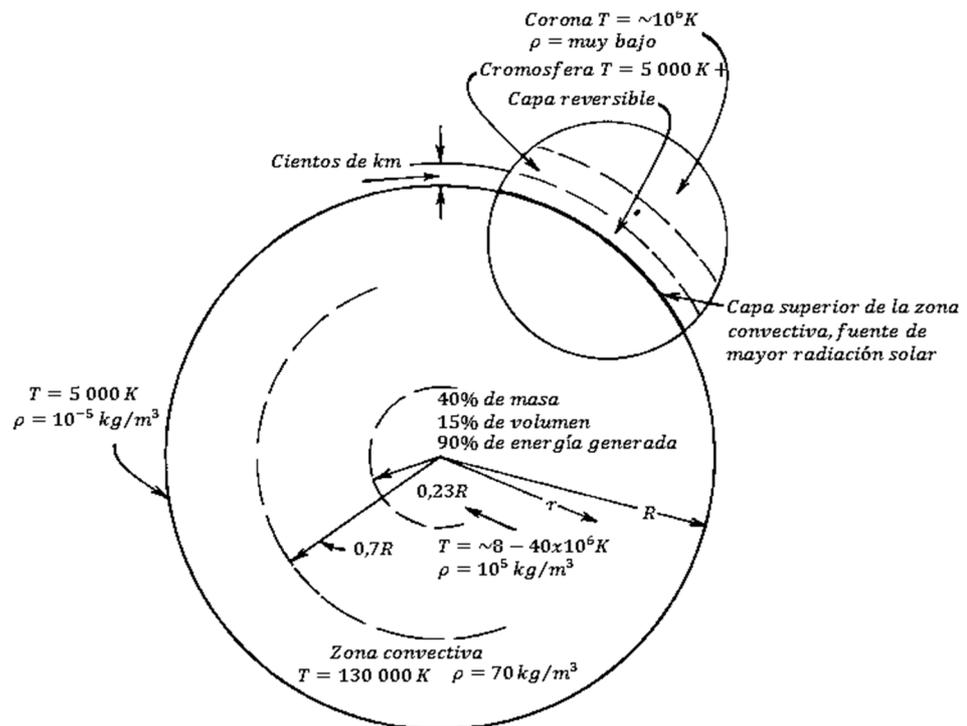


Figura N° 1. Estructura del Sol. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

Fuera de la fotosfera esta una atmosfera solar más o menos transparente, observable durante el eclipse solar total o por instrumentos que oculta el disco solar. Por encima de la fotosfera esta una capa de gases más fríos de varios de cientos de kilómetros de profundidad llamada capa invertida. Fuera de eso está una capa conocida como cromosfera, con una profundidad de aproximadamente $10\,000\, \text{km}$. Esta es una capa gaseosa con temperaturas algo superiores a la fotosfera, pero con menor densidad. Aún más hacia afuera esta la corona, una región de muy

baja densidad y de muy alta temperatura ($10^6 K$). Para más información sobre la estructura del Sol ver a Thomas (1958) o Robinson (1966).

2.1.2. La constante solar

La figura N° 2 muestra esquemáticamente la geometría de las relaciones Tierra-Sol. La excentricidad de la órbita de la Tierra es tal que la distancia entre el Sol y la Tierra, varía en un 1,7 %. A una distancia de unidad astronómica $1495 \times 10^{11} m$, la distancia promedio Tierra-Sol, el Sol subtende un ángulo de $32'$. La radiación emitida por el Sol y su relación espacial con la Tierra resulta una intensidad casi fija de radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra. La **constante solar** G_{sc} es la energía del Sol por unidad de tiempo recibida en una unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación a distancia media Tierra-Sol fuera de la atmósfera. (Duffie y Beckman, 2013)

Antes de cohetes y naves espaciales, las estimaciones de la constante Solar se tuvieron que hacer desde las mediciones terrestres de la radiación solar, después de haber sido transmitida a través de la atmósfera, en parte absorbido y dispersado por los componentes de la atmósfera. Las extrapolaciones a partir de las mediciones terrestres hechas desde las altas montañas se basan en estimaciones de transmisión atmosférica en diversas partes del espectro solar. Estudios pioneros fueron realizados por C. G. Abad y sus colegas en el instituto Smithsonian. Estos estudios y mediciones posteriores de cohetes fueron resumidos por Johnson (1954); el valor de Abad de $1322 W/m^2$ fue revisado y alzado por Johnson a $1395 W/m^2$.

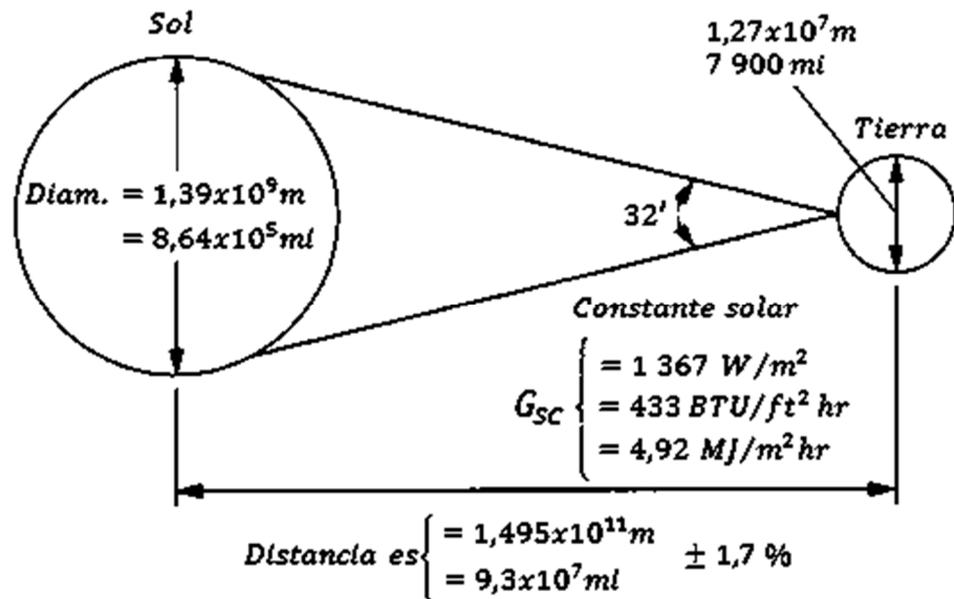


Figura N° 2. Relación Tierra-Sol. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

La disponibilidad de las aeronaves de gran altitud, globos y naves espaciales ha permitido las mediciones directas de la radiación solar fuera de la mayoría o totalidad de la atmosfera terrestre. Estas mediciones se realizaron con una variedad de instrumentos en nueve programas experimentales separadas. Que dieron como resultado un valor de constante solar G_{sc} de $1\ 353\ W/m^2$ con un error estimado de $\pm 1,5\ %$. Para discusiones de estos experimentos, ver Thekaekara (1976) o Thekaekara y Drummond (1971). Este valor aceptado por la NASA (1971) y por la American Society of Testing and Materials (2006).

Los datos en que se basa el valor de $1\ 353\ W/m^2$ se ha reexaminado por Frohlich (1977) y reducida a una nueva escala pirheliométrica basado en la comparación de los instrumentos con diámetros absolutos. Los datos de los satélites Nimbus y Mariner también se han incluido en el análisis, como Frohlich (1978) recomienda un nuevo valor de la constante solar G_{sc} de $1\ 373\ W/m^2$, con error de probabilidad de 1 a 2 %. Este fue 1,5 % superior al valor anterior y 1,2 % superior a la mejor determinación disponible de la constante solar por la integración de las mediciones espectrales. Mediciones de naves espaciales adicionales se han

hecho con Hickey y otros (1982) reportando $1\,373\text{ W/m}^2$, Willson y otros (1981) reportando $1\,368\text{ W/m}^2$. Las mediciones de tres cohetes reportados por Duncan y otros (1982) fueron $1\,367$, $1\,372$ y $1\,374\text{ W/m}^2$. El World Radiation Center (WRC) ha adoptado un valor de $1\,367\text{ W/m}^2$, con una incertidumbre de 1 %. Las incertidumbres en la mayoría de las mediciones de radiación solar terrestre son un orden de magnitud mayor que los de G_{sc} . Un valor de G_{sc} de $1\,367\text{ W/m}^2$ ($1,960\text{ cal/cm}^2\text{min}$, $433\text{ BTU/ft}^2\text{h}$ o $4,921\text{ MJ/m}^2\text{h}$) es usado actualmente. [Revisar Iqbal (1983) para obtener información más detallada sobre la constante solar.

2.1.3. Distribución espectral de la radiación extraterrestre

Además de la energía total en el espectro solar (es decir, la constante solar), es conveniente conocer la distribución espectral de la radiación extraterrestre, es decir, la radiación que se recibiría en ausencia de la atmosfera. Se ha elaborado una curva de irradiancia espectral basados en alta altitud y espacio. El WRC estándar es mostrado en la figura N° 3. Las tablas N° 1 y N° 2 proporcionan la misma información en el espectro WRC en forma numérica. La energía promedio $G_{sc,\lambda}$ (en $\text{W/m}^2\mu\text{m}$) sobre pequeños anchos de banda centrado en la longitud de onda λ , es dado en la segunda columna. La fracción $f_{0-\lambda}$ del total de energía en el espectro que esta entre longitudes de onda entre 0 y λ es dado en la tercera columna. La tabla está en dos partes, la primera en intervalos regulares de longitud de onda y el segundo en fracciones $f_{0-\lambda}$. Esta es una tabla concisa, más tablas detalladas están disponibles en otras investigaciones (ver Iqbal, 1983).

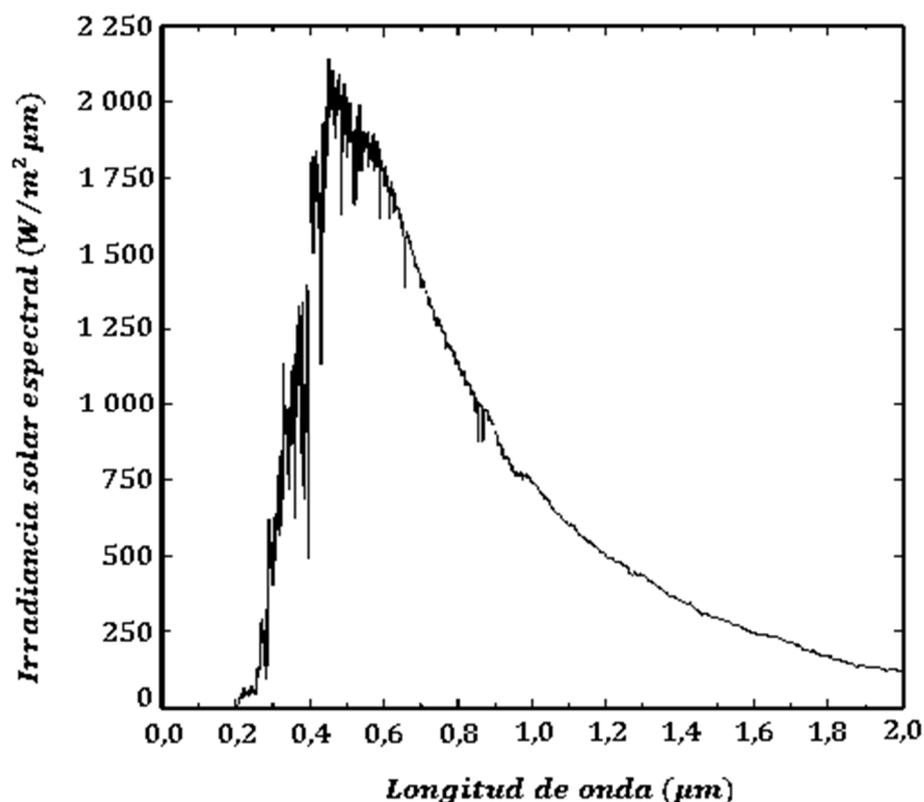


Figura N° 3. El WRC estándar, curva de irradiância espectral a media distancia Tierra-Sol. (Fuente: The World Radiation Center).

Tabla N° 1. Irradiância solar extraterrestre (WRC espectral) en incrementos de longitud de onda. (Fuente: The World Radiation Center).

λ_w (μm)	G_{SC,λ_w} ($W/m^2\mu m$)	$f_{0-\lambda}$ (-)	λ_w (μm)	G_{SC,λ_w} ($W/m^2\mu m$)	$f_{0-\lambda}$ (-)	λ_w (μm)	G_{SC,λ_w} ($W/m^2\mu m$)	$f_{0-\lambda}$ (-)
0,250	81,2	0,001	0,520	1849,7	0,243	0,880	995,0	0,622
0,275	265,0	0,004	0,530	1882,8	0,257	0,900	908,9	0,636
0,300	499,4	0,011	0,540	1877,8	0,271	0,920	847,5	0,648
0,325	760,2	0,023	0,550	1860,0	0,284	0,940	799,8	0,660
0,340	955,5	0,033	0,560	1847,5	0,298	0,960	771,1	0,672
0,350	955,6	0,040	0,570	1842,5	0,312	0,980	799,1	0,683
0,360	1053,1	0,047	0,580	1826,9	0,325	1000	753,2	0,695
0,370	1116,2	0,056	0,590	1797,5	0,338	1050	672,4	0,721
0,380	1051,6	0,064	0,600	1748,8	0,351	1100	574,9	0,744
0,390	1077,5	0,071	0,620	1738,8	0,377	1200	507,5	0,785
0,400	1422,8	0,080	0,640	1658,7	0,402	1300	427,5	0,819
0,410	1710,0	0,092	0,660	1550,0	0,425	1400	355,0	0,847
0,420	1687,2	0,105	0,680	1490,2	0,448	1500	297,8	0,871
0,430	1667,5	0,116	0,700	1413,8	0,469	1600	231,7	0,891
0,440	1825,0	0,129	0,720	1348,6	0,489	1800	173,8	0,921
0,450	1992,8	0,143	0,740	1292,7	0,508	2000	91,6	0,942
0,460	2022,8	0,158	0,760	1235,0	0,527	2500	54,3	0,968
0,470	2015,0	0,172	0,780	1182,3	0,544	3000	26,5	0,981
0,480	1975,6	0,188	0,800	1133,6	0,561	3500	15,0	0,988
0,490	1940,6	0,202	0,820	1085,0	0,578	4000	7,7	0,992
0,500	1932,2	0,216	0,840	1027,7	0,593	5000	2,5	0,996
0,510	1869,1	0,230	0,860	980,0	0,608	8,000	1,0	0,999

Tabla N° 2. Irradiancia solar extraterrestre en incrementos iguales de energía. (Fuente: The World Radiation Center).

Banda de Energía $f_i - f_{i+1}$	Rango de longitud de onda (μm)	Punto medio de longitud de onda (μm)	Banda de Energía $f_i - f_{i+1}$	Rango de longitud de onda (μm)	Punto medio de longitud de onda (μm)
0,00 - 0,05	0,250 - 0,364	0,328	0,50 - 0,55	0,731 - 0,787	0,758
0,05 - 0,10	0,364 - 0,416	0,395	0,55 - 0,60	0,787 - 0,849	0,817
0,10 - 0,15	0,416 - 0,455	0,437	0,60 - 0,65	0,849 - 0,923	0,885
0,15 - 0,20	0,455 - 0,489	0,472	0,65 - 0,70	0,923 - 1,008	0,966
0,20 - 0,25	0,489 - 0,525	0,506	0,70 - 0,75	1,008 - 1,113	1,057
0,25 - 0,30	0,525 - 0,561	0,543	0,75 - 0,80	1,113 - 1,244	1,174
0,30 - 0,35	0,561 - 0,599	0,580	0,80 - 0,85	1,244 - 1,412	1,320
0,35 - 0,40	0,599 - 0,638	0,619	0,85 - 0,90	1,412 - 1,654	1,520
0,40 - 0,45	0,638 - 0,682	0,660	0,90 - 0,95	1,654 - 2,117	1,835
0,45 - 0,50	0,682 - 0,731	0,706	0,95 - 1,00	2,117 - 10,08	2,727

2.1.4. Variación de la radiación extraterrestre

Dos fuentes de variación en la radiación extraterrestre deben ser consideradas. La primera es la variación en la radiación emitida por el Sol. Hay informes contradictorios en la literatura sobre las variaciones periódicas de la radiación solar intrínseca. Se ha sugerido que existen pequeñas variaciones (menos de $\pm 1,5\%$) con diferentes periodicidades y variaciones relacionadas con las actividades de manchas solares. Willson y otros (1981) reportaron varianzas de hasta $0,2\%$ correlativo con el desarrollo de las manchas solares. Otros consideran que las mediciones sean concluyentes o no indicativo de la variabilidad normal. Datos de Hickey y otros (1982) en un periodo de 2,5 años desde el satélite Nimbus 7 sugiere que la constante solar está disminuyendo lentamente, a un ritmo de aproximadamente $0,02\%$ por año. Ver Coulson (1975) o Thekaekara (1976) para una mayor discusión de este tema. Para los propósitos de ingeniería, en vista de las incertidumbres y la variabilidad de la transmisión atmosférica, la energía emitida por el Sol puede ser considerado fijo.

La segunda es la variación de la distancia Tierra-Sol, no obstante, conduce a la variación del flujo de radiación extraterrestre en el rango de $\pm 3,3\%$. La dependencia de la radiación extraterrestre en los meses del año se muestra en la figura N° 4. Una ecuación

sencilla con una precisión adecuada para la mayoría de los cálculos de ingeniería está dada por la ecuación 1 Spencer (1971), citado por Iqbal (1983), proporciona una ecuación más precisa ($\pm 0,01 \%$) en la forma de la ecuación 2:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (1)$$

$$G_{on} = G_{sc} (1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma) \quad (2)$$

Donde G_{on} es la radiación incidente extraterrestre sobre el plano normal a la radiación en el n ésimo día del año y Γ está dado por:

$$\Gamma = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3)$$

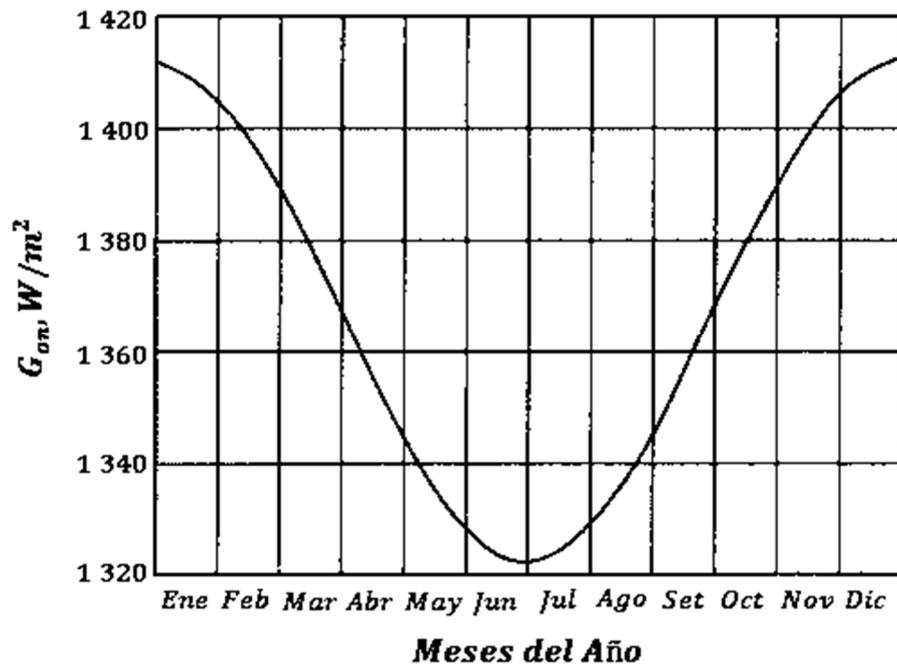


Figura N° 4. Variación de la radiación solar extraterrestre en el tiempo de un año en el hemisferio norte. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

2.1.5. Definiciones

2.1.5.1. Masa de aire

La relación de la masa de la atmósfera a través del cual pasa la radiación directa a la masa que pasaría a través de si el Sol estuviera en el cenit (es decir, directamente encima de la cabeza. Por lo tanto en el nivel del mar $m = 1$, cuando el Sol está en el cenit y $m = 2$ para un ángulo cenit θ_z de 60° . Para ángulos cenit de 0° a 70° a nivel del mar, una aproximación cercana se hace mediante la siguiente expresión (Duffie y Beckman, 2013):

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (4)$$

Para ángulos cenitales más altos, el efecto de la curvatura de la Tierra llega a ser significativa y debe tenerse en cuenta. Para una información más completa de la masa de aire, ver Robinson (1966), Kondratyev (1969), o Garg (1982).

2.1.5.2. Radiación directa

La radiación solar recibida del Sol sin haber sido dispersada por la atmósfera (para evitar confusiones de subíndices entre directa y difusa, se utilizó el subíndice “b” de beam). (Duffie y Beckman, 2013).

2.1.5.3. Radiación difusa

La radiación solar recibida del Sol después de su dirección ha sido cambiada por la dispersión por la atmósfera. (Radiación difusa se hace referencia en alguna literatura meteorológica en forma de radiación cielo o la radiación solar cielo; la definición utilizada aquí distinguirá la radiación solar difusa de la radiación infrarroja emitida por la atmósfera). (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.5.4. Radiación solar total

La suma de la radiación directa y difusa sobre la superficie. (Las mediciones más comunes de radiación solar son radiación total sobre una superficie horizontal, a menudo referida como la radiación global sobre la superficie.) (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.5.5. Irradiancia

Expresado en W/m^2 , es la velocidad a la que la energía radiante es incidente sobre un área de superficie por unidad de superficie. El símbolo G se utiliza para la irradiancia solar, con subíndices apropiados para directa, difusa, o la radiación espectral. (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.5.6. Irradiación o Exposición Radiante

Expresado en J/m^2 , es la energía incidente por unidad de área en una superficie, que se encuentra por la integración de la irradiancia durante un tiempo especificado, por lo general una hora o un día. (Duffie y Beckman, 2013)

La **insolación** es un término que se aplican específicamente a la irradiación de la energía solar. Se utiliza el símbolo H para la insolación de un día. El símbolo I sirve para la insolación de una hora (o de otro período si se especifica). Los símbolos H e I pueden representarse como directa, difusa o total y puede ser en superficies de cualquier orientación. (Duffie y Beckman, 2013)

Los subíndices en G , H , I son los siguientes: o se refiere a la radiación por encima de la atmosfera terrestre, conocida como radiación extraterrestre, b y d se refieren a la radiación directa y difusa; T y n se refieren a la radiación en un plano inclinado y en un plano normal a la dirección de propagación. Si no aparece ni T ni n , la radiación está en un plano horizontal. (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.5.7. Radiosidad o Exitancia Radiante

Expresado en W/m^2 , es la tasa en la cual energía radiante deja una superficie por unidad de área por emisión combinada, reflexión y transmisión. (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.5.8. Potencia Emisiva o Exitancia-Propia Radiante

Expresado en W/m^2 , es la velocidad a la que la energía radiante deja una superficie por unidad de área por emisión solamente. Cualquiera de estos términos de radiación, excepto la insolación, se puede aplicar a cualquier rango de longitud de onda especificada (por ejemplo, el espectro de energía solar) o a la radiación monocromática. La insolación se refiere sólo a la radiación en el espectro de energía solar. (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.5.9. Tiempo solar (tiempo definido por la posición del Sol)

El tiempo basado en el movimiento angular aparente del Sol en el cielo con el mediodía solar cuando el Sol cruza el meridiano del observador. (Duffie y Beckman, 2013)

El tiempo solar es utilizado en todas las relaciones de ángulo solar; no coincide con el tiempo del reloj local. Es necesario convertir la hora estándar al tiempo solar mediante la aplicación de dos correcciones. En primer lugar, hay una constante corrección para la diferencia de longitud entre el meridiano del observador (longitud) y el meridiano en que se basa la hora local. El Sol tarda 4 min en transversal 1° de longitud. La segunda corrección es a partir de la ecuación del tiempo, que toma en cuenta las perturbaciones en la velocidad de rotación de la Tierra el cual afectan el tiempo que el Sol cruza el meridiano del observador. La diferencia en minutos entre el tiempo solar y el tiempo estándar es (Duffie y Beckman, 2013):

$$\text{Tiempo Solar} - \text{Tiempo Estandar} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (5)$$

Donde L_{st} es el meridiano estándar para la zona horaria local, L_{loc} es la longitud de la ubicación en cuestión, las longitudes están en grados Oeste, es decir $0 < L < 360^\circ$. El parámetro E es la ecuación del tiempo (en minutos) de la figura N° 5 o ecuación 6 [de Spencer (1971), citado por Iqbal (1983)]:

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma) \quad (6)$$

Donde Γ es encontrado de la ecuación 3 y n es el enésimo día del año. Por lo tanto $1 \leq n \leq 365$. Tenga en cuenta que la ecuación del tiempo y el desplazamiento desde el meridiano estándar están ambos en minutos y que hay una diferencia de 60 *minutos* entre el horario de verano y la hora estándar. El tiempo se especifica normalmente en horas y minutos. Se debe tener cuidado en la aplicación de las correcciones, que pueden sumar más de 60 *min*.

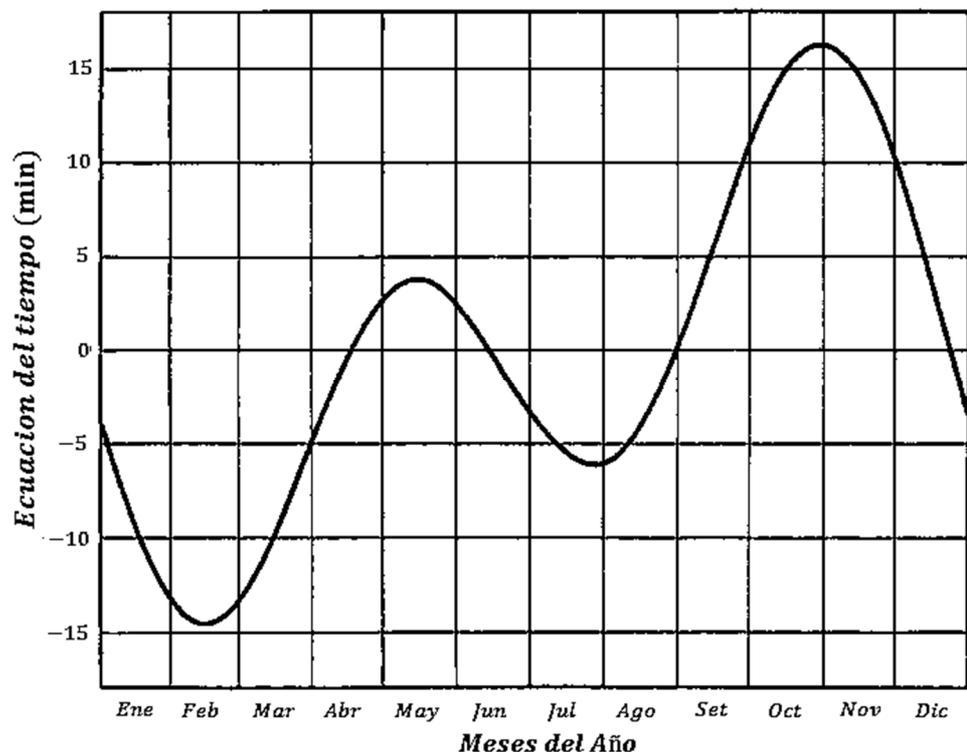


Figura N° 5. Ecuación del tiempo en minutos en función del tiempo de un año en el hemisferio norte. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

2.1.6. Dirección de la radiación directa

Las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación particular con respecto a la Tierra en cualquier momento (si ese plano es fijo o en movimiento con relación a la Tierra) y la radiación directa entrante, es decir, la posición del Sol con respecto a ese plano, puede ser descrito en términos de varios ángulos (Benford y Bock, 1939). Algunos de los ángulos se indican en la figura N° 6.

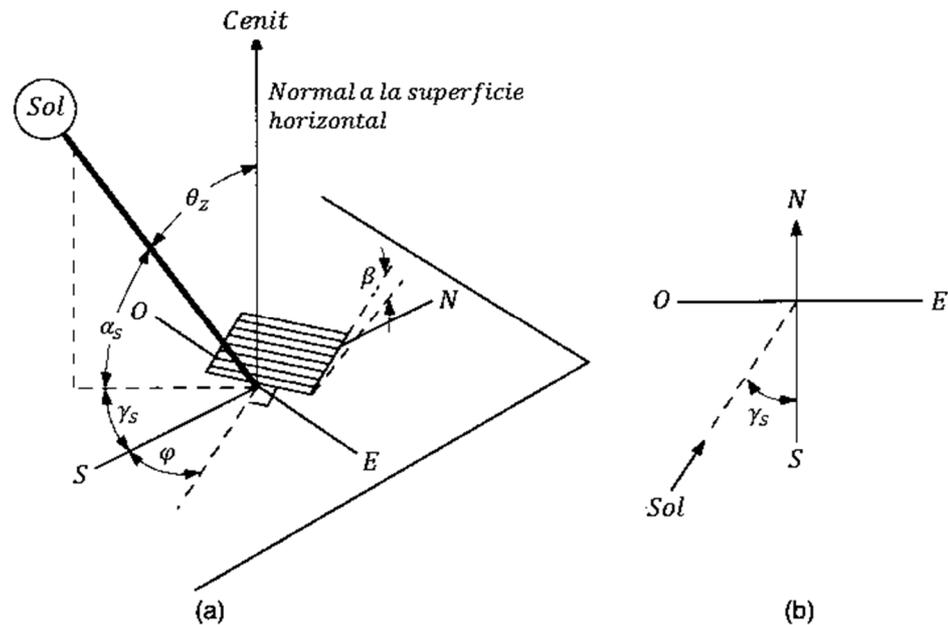


Figura N° 6. (a) Ángulo cenit, ángulo de inclinación, ángulo azimut de la superficie y ángulo de azimut solar para una superficie inclinada. (b) Vista en planta que muestra el ángulo de azimut solar. (Fuente: Benford and Bock, 1939).

Los ángulos y un conjunto de convenciones de símbolos consistentes son los siguientes (Duffie y Beckman, 2013):

Latitud (λ). La posición angular al norte o al sur del ecuador, al norte positiva; $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$

Declinación (δ). La posición angular del Sol al mediodía solar (es decir, cuando el Sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, al norte positiva; $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$

Inclinación (β). El ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ($\beta > 90^\circ$ significa que la superficie tiene una componente orientada hacia abajo.)

Ángulo azimut de la superficie (φ). La desviación de la proyección sobre un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero justo en el sur, este negativo y oeste positivo.

Ángulo horario (ω). El desplazamiento angular del Sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la Tierra sobre su eje en 15° por hora; mañana negativo, tarde positivo.

Ángulo de incidencia (θ). El ángulo entre la radiación directa sobre una superficie y la normal a dicha superficie.

Ángulos adicionales definidos que describen la posición del Sol en el cielo:

Ángulo cenit (θ_z). El ángulo entre la vertical y la línea del Sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación del haz sobre una superficie horizontal.

Ángulo de altitud solar (α_s). El ángulo entre la horizontal y la línea del Sol, es decir, el complemento del ángulo cenit.

Ángulo de azimut solar (γ_s). El desplazamiento angular del sur de la proyección de radiación directa en el plano horizontal, se muestra en la figura N° 6. Desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos.

Puede encontrarse la declinación δ de la ecuación aproximada de Cooper (1969):

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (7)$$

O a partir de la ecuación más precisa (error $< 0,035^\circ$) [de Spencer (1971), citado por Iqbal (1983)]:

$$\delta = (180/\pi)(0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma) \quad (8)$$

Donde Γ se obtiene de la ecuación 3 y el día enésimo del año n se puede obtener convenientemente con la ayuda de la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Días promedio para los meses y los valores de n por Meses recomendados ^a. (Fuente: Klein, 1977).^a

Meses del Año	n para el i -ésimo día del mes	Para el día promedio del mes		
		Fecha	n	δ
Enero	i	17	17	-20,9
Febrero	$31 + i$	16	47	-13,0
Marzo	$59 + i$	16	75	-2,4
Abril	$90 + i$	15	105	9,4
Mayo	$120 + i$	15	135	18,8
Junio	$151 + i$	11	162	23,1
Julio	$181 + i$	17	198	21,2
Agosto	$212 + i$	16	228	13,5
Setiembre	$243 + i$	15	258	2,2
Octubre	$273 + i$	15	288	-9,6
Noviembre	$304 + i$	14	318	-18,9
Diciembre	$334 + i$	10	344	-23,0

^a No utilizar para $|\lambda| > 66.5^\circ$

La variación en la distancia Tierra-Sol (como se indica en la sección 2.1.4), la ecuación del tiempo E (como se indica en la sección 2.1.5), y la declinación son todos continuamente variable en función del tiempo del año. Para muchos fines de cálculo se acostumbra a expresar la época del año en términos de n , el día del año, y por lo tanto como un entero entre 1 y 365. Las ecuaciones 1, 2, 3, 6, 7 y 8 podrían ser utilizado con valores no enteros de n . Tenga en cuenta que la tasa máxima de cambio de declinación es de alrededor de $0,4^\circ$ por día. El uso de valores enteros de n es adecuada para la mayoría de los cálculos de ingeniería. (Duffie y Beckman, 2013)

Hay un conjunto de relaciones útiles entre estos ángulos. ecuaciones que relacionan el ángulo de incidencia de la radiación

directa sobre una superficie θ , a los otros ángulos son (Duffie y Beckman, 2013):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \lambda \cos \beta - \sin \delta \cos \lambda \sin \beta \cos \varphi \\ & + \cos \delta \cos \lambda \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \lambda \sin \beta \cos \varphi \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \varphi \sin \omega \end{aligned} \quad (9)$$

Y

$$\cos \theta = \cos \theta_z \sin \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \varphi) \quad (10)$$

El ángulo θ puede exceder de 90° , lo que significa que el Sol está detrás de la superficie. Además, al utilizar la ecuación 9, es necesario asegurarse de que la Tierra no está bloqueando el Sol (es decir, que el ángulo horario es entre la salida y la puesta del Sol).

Hay varios casos que ocurren comúnmente, para lo cual se simplifica la ecuación 9. Para superficies fijas inclinadas hacia el sur o el norte, es decir, con un ángulo de azimut de la superficie φ de 0° o 180° (una situación muy común para los colectores solares planos fijos), el último término se retira. (Duffie y Beckman, 2013)

Para superficies verticales, $\beta = 90^\circ$ y la ecuación se convierte en:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & -\sin \delta \cos \lambda \cos \varphi + \cos \delta \sin \lambda \cos \varphi \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \omega \end{aligned} \quad (11)$$

Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es el ángulo cenital del Sol θ_z . Su valor debe estar entre 0° y 90° , cuando el Sol está sobre el horizonte. Para esta situación, $\beta = 0^\circ$ y la ecuación 9 se convierte (Duffie y Beckman, 2013):

$$\cos \theta_z = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta \quad (12)$$

El ángulo de azimut solar γ_s , puede tener valores en el rango de 180° a -180° . Para latitudes norte o sur entre $23,45^\circ$ y $66,45^\circ$, γ_s

estará entre 90° y -90° para los días de menos de 12 h de duración; para los días con más de 12 horas entre el amanecer y el atardecer, γ_s será superior a 90° o inferior a -90° temprano y tarde en el día cuando el Sol está al norte de la línea este-oeste en el hemisferio norte o sur de la línea este-oeste en el hemisferio sur. Para latitudes tropicales, γ_s puede tener cualquier valor cuando $\delta - \lambda$ es positivo en el hemisferio norte o negativo en el sur, por ejemplo, justo antes del mediodía en $\lambda = 10^\circ$ y $\delta = 20^\circ$, $\gamma_s = -180^\circ$ y justo después del mediodía $\gamma_s = +180^\circ$. Por lo tanto γ_s es negativo cuando el ángulo horario es negativo y positivo cuando el ángulo horario es positivo. La función de signo en la ecuación 13 es igual a +1 si ω es positivo y es igual a -1 si ω es negativo (Duffie y Beckman, 2013):

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \lambda - \sin \delta}{\sin \theta_z - \cos \lambda} \right) \right| \quad (13)$$

Relaciones útiles para el ángulo de incidencia de superficies inclinadas hacia el norte o hacia el sur se puede derivar del hecho de que la superficie con inclinación β hacia el norte o sur tiene la misma relación angular a la radiación directa como una superficie horizontal a una latitud artificial de $\lambda - \beta$. La relación se muestra en la figura N° 7 para el hemisferio norte.

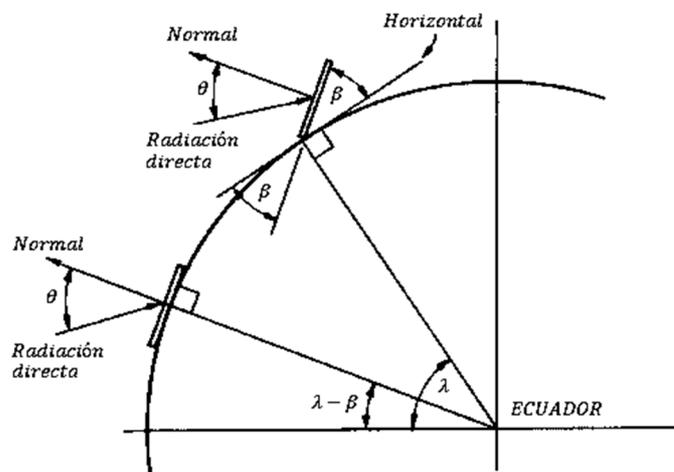


Figura 7. Sección de la Tierra que muestra β , θ , λ y $\lambda - \beta$ para una superficie orientada hacia el sur. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

Modificando la ecuación 12, produciendo (Duffie y Beckman, 2013):

$$\cos \theta = \cos(\lambda - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\lambda - \beta) \sin \delta \quad (14)$$

Para el hemisferio sur modificar la ecuación mediante la sustitución de $\lambda - \beta$ por $\lambda + \beta$, de acuerdo con las convenciones de signos de λ y δ , se tiene (Duffie y Beckman, 2013):

$$\cos \theta = \cos(\lambda + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\lambda + \beta) \sin \delta \quad (15)$$

Para el caso especial de mediodía solar, para la superficie inclinada orientada al sur en el hemisferio norte (Duffie y Beckman, 2013):

$$\theta_{noon} = |\lambda - \delta - \beta| \quad (16)$$

Y para el hemisferio sur:

$$\theta_{noon} = |-\lambda + \delta - \beta| \quad (17)$$

Donde $\beta = 0$, el ángulo de incidencia es el ángulo cenit, para el hemisferio norte es (Duffie y Beckman, 2013):

$$\theta_{z,noon} = |\lambda - \delta| \quad (18)$$

Y para el hemisferio sur:

$$\theta_{z,noon} = |-\lambda + \delta| \quad (19)$$

La ecuación 12 puede ser resuelto para el **ángulo horario de atardecer** ω_s , cuando $\theta_z = 90^\circ$ (Duffie y Beckman, 2013):

$$\cos \theta_z = -\frac{\sin \lambda \sin \delta}{\lambda \cos \delta} = -\tan \lambda \tan \delta \quad (20)$$

El ángulo horario del amanecer es el negativo del ángulo horario del atardecer. También se deduce que el número de horas de luz es dada por (Duffie y Beckman, 2013):

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \lambda \tan \delta) \quad (21)$$

Un nomograma conveniente para determinar la duración del día ha sido ideado por Whillier (1965) y se muestra en la figura N° 8. La información sobre la latitud y declinación de cualquiera de los hemisferios conduce directamente a horas de salida y puesta de Sol y la duración del día.

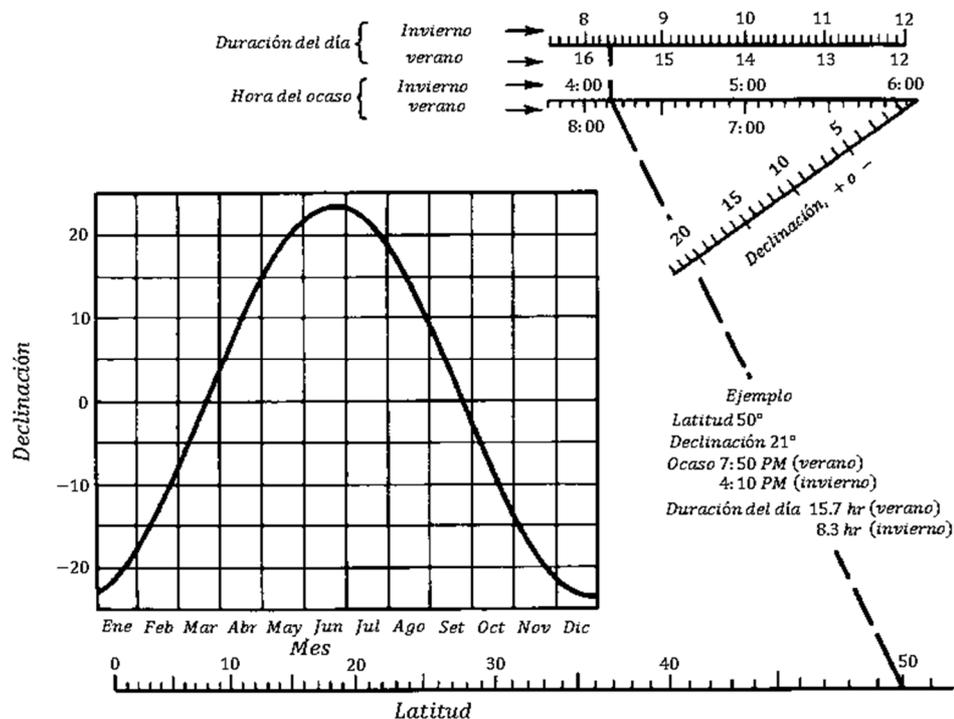


Figura N° 8. Monograma para determinar la hora del ocaso y duración del día. (Fuente: Whillier, 1965).

Un ángulo adicional de interés es el ángulo del perfil de radiación directa en un plano receptor R que tiene un ángulo de azimut de la superficie φ . Este es la proyección del ángulo de altitud solar en un plano vertical perpendicular al plano en cuestión. Expresado de otra manera, es el ángulo a través del cual un plano que es

inicialmente horizontal se debe girar alrededor de un eje en el plano de la superficie en cuestión con el fin de incluir el Sol. El ángulo de altitud solar α_s (es decir, el ángulo EAD en la figura N° 9) y el ángulo de perfil α_p (es decir, el ángulo fab en la figura N° 9) para el plano R se muestran en la Figura 9. El plano $adef$ en la figura N° 9 incluye el Sol. Tenga en cuenta que la altura solar y el ángulo de perfil son los mismos cuando el Sol está en un plano perpendicular a la superficie R (por ejemplo, a mediodía solar para una superficie con un ángulo de azimut superficie de 0° o 180°). El ángulo de perfil es útil en el cálculo de sombreado por voladizos y se puede determinar a partir de (Duffie y Beckman, 2013):

$$\tan \alpha_p = \frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \varphi)} \quad (22)$$

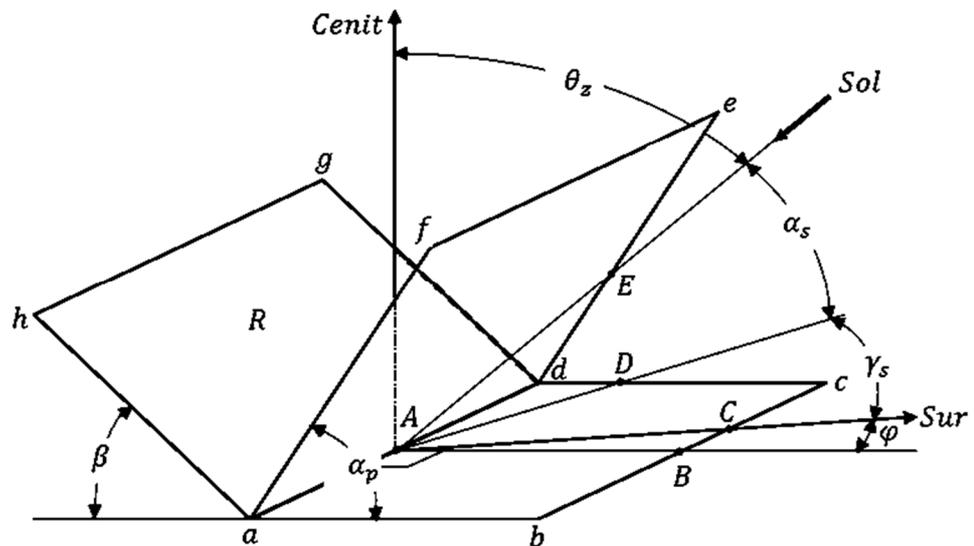


Figura N° 9. El ángulo de altitud solar α_s ($\angle EAD$) y el ángulo de perfil α_p ($\angle fab$) para la superficie R . (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

Los ángulos de azimut y altitud solar están tabulados en función de la latitud, declinación, y el ángulo horario por la U.S. Hydrographic Office (1940). ecuaciones exactas están disponibles en el sitio web de la National Renewable Energy Laboratory. La información sobre

la posición del Sol en el cielo también está disponible con menos precisión pero con fácil acceso a diversos tipos de gráficos. Es necesario tener cuidado en la interpretación de información de otras fuentes, ya que la nomenclatura, definiciones y convenciones de signos pueden variar de los que se utilizan aquí (Duffie y Beckman, 2013).

2.1.7. Relación de la radiación directa sobre la superficie inclinada y superficie horizontal

Para los fines de diseño de proceso solar y los cálculos de rendimiento, a menudo es necesario calcular la radiación horaria sobre una superficie inclinada de un colector a partir de mediciones o estimaciones de la radiación solar sobre una superficie horizontal. Los datos más comúnmente disponibles son la radiación total por horas o días sobre la superficie horizontal, mientras que la necesidad es por la radiación directa y difusa sobre el plano de un colector (Duffie y Beckman, 2013).

El factor geométrico R_b , es la relación de radiación directa sobre la superficie inclinada para que sobre una superficie horizontal en cualquier momento, puede ser calculado exactamente por el uso apropiado de la ecuación 9. La figura N° 10 indica el ángulo de incidencia de radiación directa sobre la superficie horizontal e inclinada. La relación $G_{b,T}/G_b$ es dada por (Duffie y Beckman, 2013):

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (23)$$

$\cos \theta$ y $\cos \theta_z$ son ambos determinados por la ecuación 9 (o de las ecuaciones derivadas de éstas).

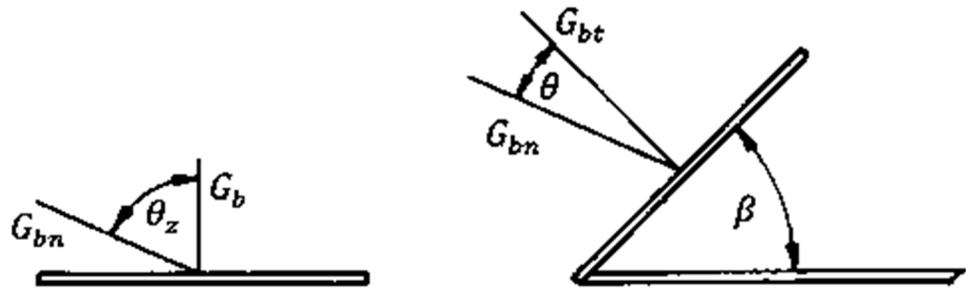


Figura N° 10. Radiación directa sobre superficie horizontal e inclinada. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

El ángulo azimut óptimo para colectores de placa plana es generalmente 0° en el hemisferio norte (o 180° en el hemisferio sur). Por lo tanto es una situación común que $\varphi = 0^\circ$ (o 180°). En este caso, las ecuaciones 12, 14 y 15 se pueden utilizar para determinar $\cos \theta_z$ y $\cos \theta$, respectivamente, lo que lleva en el hemisferio norte, para $\varphi = 0^\circ$, a (Hottel y Woertz, 1942):

$$R_b = \frac{\cos(\lambda - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\lambda - \beta) \sin \delta}{\cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta} \quad (24)$$

En el hemisferio sur, $\varphi = 180^\circ$ y la ecuación es:

$$R_b = \frac{\cos(\lambda + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\lambda + \beta) \sin \delta}{\cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta} \quad (25)$$

Un caso especial de interés es $R_{b,noon}$, la relación de las superficies orientadas al sur al mediodía solar. De las ecuaciones 16 y 18, para el hemisferio norte (Duffie y Beckman, 2013):

$$R_{b,noon} = \frac{\cos|\lambda - \delta - \beta|}{\cos|\lambda - \delta|} \quad (26)$$

Para el hemisferio sur, a partir de las ecuaciones 17 y 19:

$$R_{b,noon} = \frac{\cos|-\lambda + \delta - \beta|}{\cos|-\lambda + \delta|} \quad (27)$$

Hottel y Woertz (1942) señalaron que la ecuación 24 proporciona un cómodo método de cálculo de R_b para los casos más comunes. Los cálculos de rendimiento de proceso solar se realizan muy a menudo sobre una base cada hora. Los gráficos $\cos \theta_z$ aparecen por los puntos medios de horas antes y después del mediodía solar, y los valores de R_b de ellos se aplican a esas horas. (Este procedimiento es satisfactorio durante más horas del día, pero en horas que incluyen el amanecer y el atardecer, pueden obtenerse valores representativos del R_b . La captación solar en esas horas es lo más a menudo cero o una parte insignificante de la producción total del colector diaria. Sin embargo, se debe tener cuidado de que no se utilizan productos poco irreales de R_b y radiación directa I_b . Es posible utilizando la ecuación 24 la construcción de graficas que muestran los efectos de inclinación del colector de R_b para diferentes épocas del año y el día. La figura N° 11 muestra un gráfico de este tipo para una latitud de 40° y una inclinación de colector de 50° . Muestra que aumentos muy grandes en la radiación directa incidente se tuvo por la inclinación de una superficie receptora hacia el Ecuador (Duffie y Beckman, 2013).

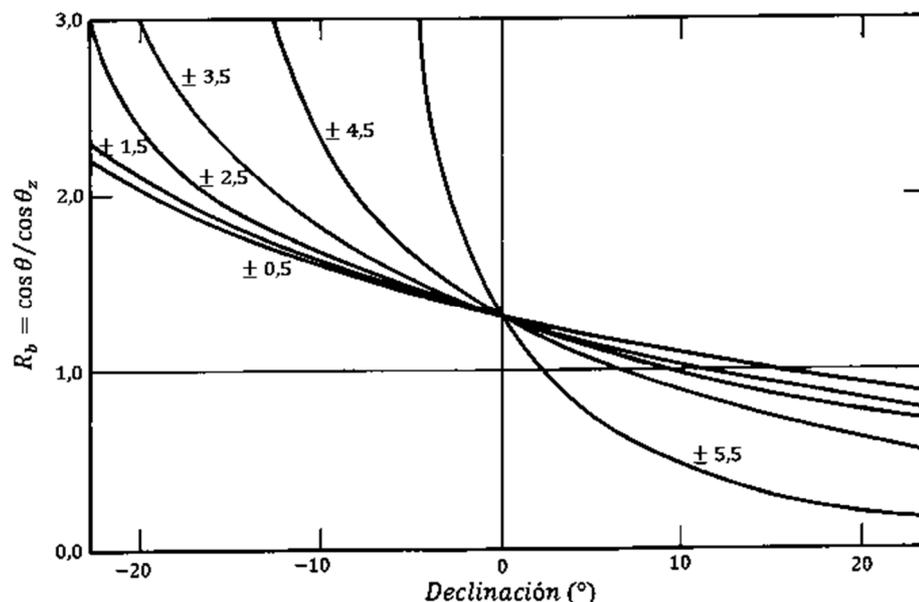


Figura N° 11. Relación R_b para una superficie con una inclinación de 50° hacia el sur a 40° de latitud, para varias horas a partir del mediodía. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

La ecuación 23 también se puede aplicar a otro que los de colectores de placa plana fija. (Duffie y Beckman, 2013)

2.1.8. Sombreado

Hay tres tipos de problemas de sombreado, se producen con tanta frecuencia que se necesitan métodos para hacer frente a ellos. El primero es el sombreado de un colector, ventana, u otro receptor de árboles cercanos, edificios u otros obstáculos. Las geometrías pueden ser irregulares, y los cálculos sistemáticos de sombreado del receptor en cuestión pueden ser difíciles. Se recurre a los diagramas de la posición del Sol en el cielo, por ejemplo, gráficos de α_s altitud solares frente a γ_s azimut solar, en el que formas de las obstrucciones (perfiles de sombreado) se pueden superponer para determinar cuando la trayectoria desde el Sol para hacia el punto en cuestión está bloqueado. El segundo tipo incluye el sombreado de colectores en otros, ya que la primera fila de múltiple filas arreglados por los colectores, produce sombras en la fila contigua. El tercero incluye el sombreado de ventanas por voladizos y aleros en paredes. Cuando las geometrías son regulares, el sombreado es susceptible de calcular, y los resultados pueden presentarse en forma general (Duffie y Beckman, 2013).

En cualquier punto en el tiempo y en una latitud en particular λ , δ y ω son fijos. A partir de las ecuaciones en la sección 2.1.6, el ángulo cenital θ_z o ángulo de altitud solar α_s y el ángulo de azimut γ_s solares se pueden calcular. Una gráfica de la posición solar θ_z y α_s frente γ_s para latitudes de $\pm 45^\circ$ se muestra en la figura N° 12 (Duffie y Beckman, 2013).

Las líneas de declinación constante son etiquetadas por las fechas de la media de días de los meses de la Tabla N° 3. También se muestran las líneas de ángulos horarios constantes marcadas por horas (Duffie y Beckman, 2013).

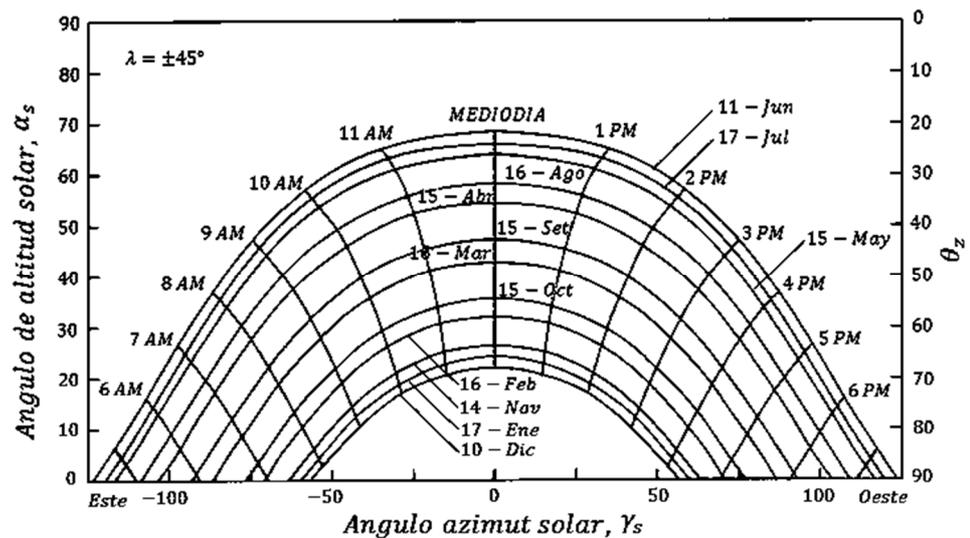


Figura N° 12. Gráfico de la posición solar para una latitud de $\pm 45^\circ$. El ángulo de altitud solar y ángulo de azimut solar son función de la declinación y ángulo horario, indicados en el gráfico por fechas y hora. Los datos mostrados son en el hemisferio norte. (Fuente: Duffie y Beckman).

La posición angular de edificios, alero de pared, salientes, u otras obstrucciones se puede introducir en la misma gráfica. Por ejemplo, como se observa por Mazria (1979) y Anderson (1982), si un edificio u otra obstrucción de dimensiones y orientación conocidas se encuentra a una distancia conocida desde el punto de interés (es decir, el receptor, colector, o una ventana), las coordenadas angulares que corresponden a los ángulos de altitud y azimut de puntos sobre la obstrucción (ángulo azimut γ_0 y ángulo altitud α_0) se pueden calcular a partir de consideraciones trigonométricas. Alternativamente, las mediciones de ángulos de altitud y azimut se pueden hacer en el sitio de un receptor propuesto y los ángulos se representan en el gráfico de posición solar. Instrumentos son disponibles para medir los ángulos.

Puede haber algo de libertad en la selección de puntos para ser utilizado en el trazado de coordenadas del objeto, y el cálculo puede ser hecho más fácil mediante la selección de los puntos más apropiados. Aplicaciones de la trigonometría siempre proporcionarán la información necesaria. Para obstáculos como

edificios, los puntos seleccionados deben incluir esquinas o límites que definen el grado de obstrucción (Duffie y Beckman, 2013).

En la discusión anterior está implícita la idea de que la posición solar en un punto en el tiempo puede ser representada por un punto de ubicación. Los colectores y los receptores tienen un tamaño finito, lo que un punto en una gran superficie receptora "ve" no puede ser igual a lo que otro punto ve. El problema es a menudo para determinar la cantidad de radiación directa en un receptor. Si el sombreado de las obstrucciones está lejos del receptor en relación a su tamaño, por lo que las sombras tienden a moverse a través del receptor rápidamente y el receptor es o bien sombreada o no sombreado, el receptor puede considerarse como un punto. Si un receptor está parcialmente sombreado, se puede considerar que consisten en una serie de áreas más pequeñas, cada una de las cuales está sombreado o no sombreado. O integración en el área del receptor puede realizarse para determinar efectos de sombreado. Estas integraciones se han realizado para los casos especiales de voladizos y aleros en pared. Voladizos y aleros de pared son elementos arquitectónicos que se aplican a edificios para sombrear ventanas de la radiación directa. Las cartas de la posición solar pueden utilizarse para determinar cuándo se sombran los puntos en el receptor. La obstrucción en el caso de un alero y los tiempos cuando el punto está sombreado de radiación directa, son los tiempos correspondientes a las áreas por encima de la línea. Este procedimiento se puede utilizar para voladizos de cualquiera de longitud finita o infinita. Los mismos conceptos se pueden aplicar a los aleros en pared (Duffie y Beckman, 2013).

Un voladizo se muestra en la sección transversal en la figura N° 13 (a) para la situación más común de una ventana vertical. La proyección P es la distancia horizontal desde el plano de la ventana hasta el borde exterior del voladizo. El hueco G es la distancia vertical desde la parte superior de la ventana hacia el plano

horizontal que incluye el borde exterior del voladizo. La altura H es la dimensión vertical de la ventana. (Duffie y Beckman, 2013)

El concepto de los planos de sombreado se introdujo por Jones (1980) como una forma útil de considerar sombreado por voladizos donde los efectos finales son insignificantes. Dos planos de sombra están marcados en la figura N° 13(b). El ángulo de incidencia de la radiación directa sobre un plano sombreado puede ser calculado a partir de su ángulo azimut de la superficie φ y su ángulo de inclinación $\beta = 90 + \psi$ por la ecuación 9 o equivalente. El ángulo ψ del plano sombreado 1 es $\tan^{-1}[P/(G + H)]$ y para el plano sombreado 2 es $\tan^{-1}(P/G)$. Tenga en cuenta que si el ángulo de perfil α_p es inferior al $90 - \psi$, la superficie exterior del plano sombreado “verá” el Sol y la radiación directa, llegaría al receptor (Jones, 1980). (Duffie y Beckman, 2013).

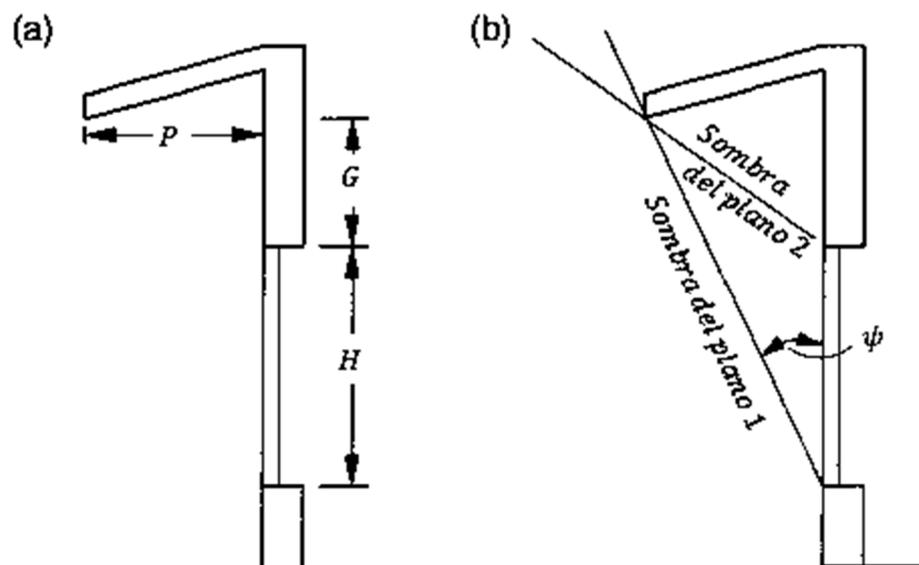


Figura N° 13. (a) Sección transversal de un voladizo largo mostrando la proyección, hueco y altura. (b) Sección que muestra planos de sombreado. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

Se necesitan cálculos de sombreado cuando los colectores de placa plana están dispuestos en filas. Normalmente, la primera fila es sin obstáculos, pero la segunda fila puede ser sombreada en

parte por el primero, el tercero por la segunda, y así sucesivamente. Esta disposición de los colectores se muestra en sección transversal en la figura N° 14. (Duffie y Beckman, 2013)

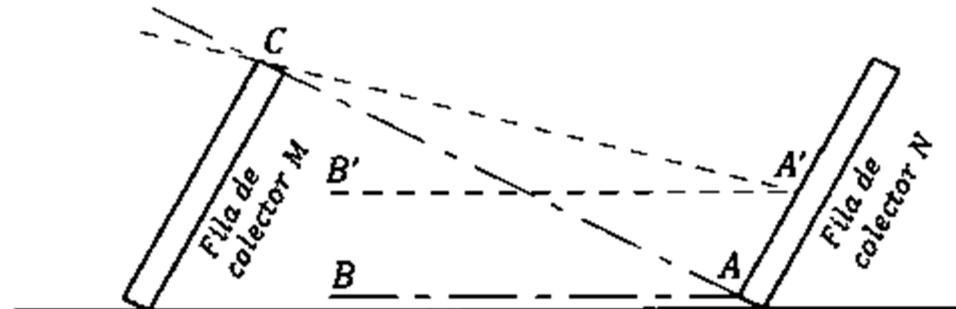


Figura N° 14. Sección de dos filas de un arreglo de colector de múltiples filas. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

Para el caso en que los colectores son de largo alcance en lo que los efectos finales son insignificantes, el ángulo de perfil proporciona un medio útil para determinar el sombreado. Siempre y cuando el ángulo de perfil es mayor que el ángulo CAB , ningún punto en la fila N será sombreado por fila M . Si el ángulo de perfil en un punto en el tiempo es $CA'B'$ y es menor que CAB , la parte de la fila N debajo del punto A' será la sombra de la radiación directa (Duffie y Beckman, 2013).

2.1.9. Radiación extraterrestre sobre la superficie horizontal

Varios tipos de cálculos de radiación más convenientemente se realizan utilizando los niveles de radiación normalizada, es decir, la relación del nivel de radiación a la radiación teóricamente posible que estaría disponible si no hubiera atmosfera. Para estos cálculos, necesitamos un método de cálculo de la radiación extraterrestre. En cualquier momento, la radiación solar incidente sobre un plano horizontal fuera de la atmósfera es la radiación solar incidente normal dado por la ecuación 1 dividido por R_b (Duffie y Beckman, 2013):

$$G_0 = G_{sc} \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta_z \quad (28)$$

Donde G_{sc} es la constante solar y n es el día enésimo del año. Combinando la ecuación 12 para $\cos \theta_z$ con la ecuación 28 da G_0 para una superficie horizontal en cualquier momento entre la salida y la puesta del Sol (Duffie y Beckman, 2013):

$$G_0 = G_{sc} \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) \quad (29)$$

A menudo es necesario para el cálculo de la radiación solar diaria para tener la radiación extraterrestre diaria integrada en una superficie horizontal H_0 . Esto se obtiene integrando la ecuación 29 durante el período desde la salida hasta la puesta del Sol. Si G_{sc} está en vatios por metro cuadrado, H_0 diaria en julios por metro cuadrado por día es (Duffie y Beckman, 2013):

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta) \quad (30)$$

Donde ω_s es el ángulo horario de la puesta del Sol, en grados, de la ecuación 20.

La media diaria de radiación extraterrestre mensual $\overline{H_0}$ es una cantidad útil. Para latitudes en el rango de 60° a -60° se puede calcular con la ecuación 30 usando n y δ para el día medio del mes de la Tabla N° 3. La radiación media H_0 se representa como una función de la latitud para los hemisferios norte y sur en la figura N° 15. Las curvas son para las fechas que dan la radiación media para el mes y éste muestra $\overline{H_0}$. Los valores de H_0 para cualquier día pueden estimarse por interpolación. (Duffie y Beckman, 2013). Los valores exactos de $\overline{H_0}$ para todas las latitudes se dan en la Tabla N° 4.

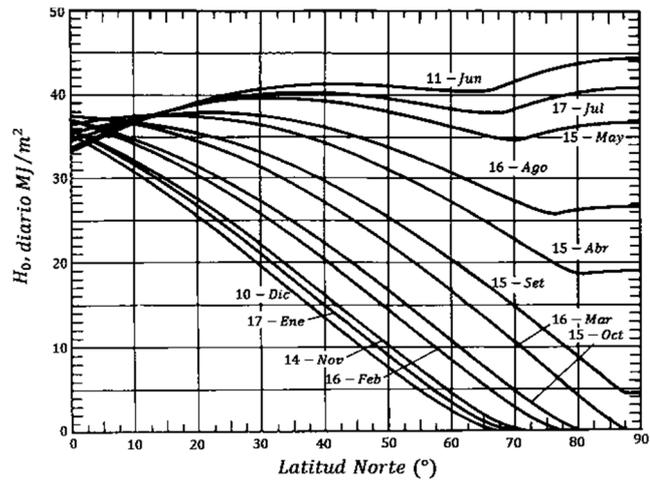


Figura N° 15. Radiación extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal. La curva es para los días medios del mes de la Tabla N° 3. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).

Tabla N° 4. Radiación extraterrestre diaria promedio mensual, MJ/m². (Fuente Duffie y Beckman, 2013).

λ	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
90	0,0	0,0	1,2	19,3	37,2	44,8	41,2	26,5	5,4	0,0	0,0	0,0
85	0,0	0,0	2,2	19,2	37,0	44,7	41,0	26,4	6,4	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	4,7	19,6	36,6	44,2	40,5	26,1	9,0	0,6	0,0	0,0
75	0,0	0,7	7,8	21,0	35,9	43,3	39,8	26,3	11,9	2,2	0,0	0,0
70	0,1	2,7	10,9	23,1	35,3	42,1	38,7	27,5	14,8	4,9	0,3	0,0
65	1,2	5,4	13,9	25,4	35,7	41,0	38,3	29,2	17,7	7,8	2,0	0,4
60	3,5	8,3	16,9	27,6	36,6	41,0	38,8	30,9	20,5	10,8	4,5	2,3
55	6,2	11,3	19,8	29,6	37,6	41,3	39,4	32,6	22,1	13,8	7,3	4,8
50	9,1	14,4	22,5	31,5	38,5	41,5	40,0	34,1	25,5	16,7	10,3	7,7
45	12,2	17,4	25,1	33,2	39,2	41,7	40,4	35,3	27,8	19,6	13,3	10,7
40	15,3	20,3	27,4	34,6	39,7	41,7	40,6	36,4	29,8	22,4	16,4	13,7
35	18,3	23,1	29,6	35,8	40,0	41,5	40,6	37,3	31,7	25,0	19,3	16,8
30	21,3	25,7	31,5	36,8	40,0	41,1	40,4	37,8	33,2	27,4	22,2	19,9
25	24,2	28,2	33,2	37,5	39,8	40,4	40,0	38,2	34,6	29,6	25,0	22,9
20	27,0	30,5	34,7	37,9	39,3	39,5	39,3	38,2	35,6	31,6	27,7	25,8
15	29,6	32,6	35,9	38,0	38,5	38,4	38,3	38,0	36,4	33,4	30,1	28,5
10	32,0	34,4	36,8	37,9	37,5	37,0	37,1	37,5	37,0	35,0	32,4	31,1
5	34,2	36,0	37,5	37,4	36,3	35,3	35,6	36,7	37,0	36,3	34,5	33,5
0	36,2	37,4	37,8	36,7	34,8	33,5	34,0	35,7	37,2	37,3	36,3	35,7
-5	38,0	38,5	37,9	35,8	33,0	31,4	32,1	34,4	36,9	38,0	37,9	37,6
-10	39,5	39,3	37,7	34,5	31,1	29,2	29,9	32,9	36,3	38,5	39,3	39,4
-15	40,8	39,8	37,2	33,0	28,9	26,8	27,6	31,1	35,4	38,7	40,4	40,9
-20	41,8	40,0	36,4	31,3	26,6	24,2	25,2	29,1	34,3	38,6	41,2	42,1
-25	42,5	40,0	35,4	29,3	24,1	21,5	22,6	27,0	32,9	38,2	41,7	43,1
-30	43,0	39,7	34,0	27,2	21,4	18,7	19,9	24,6	31,2	37,6	42,0	43,8
-35	43,2	39,1	32,5	24,8	18,6	15,8	17,0	22,1	29,3	36,6	42,0	44,2
-40	43,1	38,2	30,6	22,3	15,8	12,9	14,2	19,4	27,2	35,5	41,7	44,5
-45	42,8	37,1	28,6	19,6	12,9	10,0	11,3	16,6	24,9	34,0	41,2	44,5
-50	42,3	35,7	26,3	16,8	10,0	7,2	8,4	13,8	22,4	32,4	40,5	44,3
-55	41,7	34,1	23,9	13,9	7,2	4,5	5,7	10,9	19,8	30,5	39,6	44,0
-60	41,0	32,4	21,2	10,9	4,5	2,2	3,1	8,0	17,0	28,4	38,7	43,7
-65	40,5	30,6	18,5	7,9	2,1	0,3	1,0	5,2	14,1	26,2	37,8	43,7
-70	40,8	28,8	15,6	5,0	0,4	0,0	0,0	2,6	11,1	24,0	37,4	44,9
-75	41,9	27,6	12,6	2,4	0,0	0,0	0,0	0,8	8,0	21,9	38,1	46,2
-80	42,7	27,4	9,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	20,6	38,8	47,1
-85	43,2	27,7	7,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	20,3	39,3	47,6
-90	43,3	27,8	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	20,4	39,4	47,8

Es también de interés para calcular la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal para un período horas. La integración de la ecuación 29 durante un periodo comprendido entre los ángulos horarios ω_1 y ω_2 que definen una hora (donde ω_2 es el más grande):

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left[\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (31)$$

Los límites ω_1 y ω_2 pueden definir un tiempo que no sea una hora. La radiación extraterrestre horaria también se puede aproximar por lo escrito en la ecuación 29 en términos de I , evaluando ω en el punto medio de la hora. Las diferencias entre la radiación horaria calculados por estos dos métodos será ligeramente más grande a veces cerca del amanecer y el atardecer, pero aún son pequeños. Para períodos de tiempo más grandes, las diferencias se hacen más grandes. (Duffie y Beckman, 2013)

2.2. Medición de la radiación solar

2.2.1. Piranómetro

Un piranómetro es un instrumento para medir radiación solar total atmosférica (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal y es a partir de estos instrumentos que se obtiene la mayoría de datos disponible sobre radiación solar. Si se sombrea la radiación directa por un disco o anillo de sombra, el piranómetro mide radiación difusa. Los detectores para estos instrumentos deben tener una respuesta independiente de la longitud de onda de la radiación sobre el espectro de la energía solar. Además, deben tener una respuesta independiente del ángulo de incidencia de la radiación solar. Los detectores de la mayoría de los piranómetros están cubiertos con una o dos cubiertas de vidrio hemisféricas para protegerlos del viento y otros efectos extraños; las cubiertas deben

ser muy uniforme en espesor a fin de no causar distribución desigual de la radiación sobre los detectores. Estos factores se discuten en más detalle por Coulson (1975).

El piranómetro espectral de precisión (PSP) utiliza un detector termopila, dos cubiertas esmeriladas hemisféricas concéntricas ópticamente, la compensación de temperatura que resulta en dependencia de la temperatura de 0,5 % a partir de -20° a 40°C . [Mediciones de la irradiancia en bandas espectrales se pueden hacer mediante el uso de filtros de paso de banda; el PSP puede ser equipado con cúpulas semiesféricas de vidrio de filtro para este propósito. Ver Stewart y otros (1985) para obtener información y referencias. Esto se muestra en la figura N° 16.



Figura N° 16. Piranómetro de precisión espectral (PSP) Delta Ohm. (Fuente: Propia, 2016).

Los piranómetros son generalmente calibrados frente a pirheliómetros estándar. Un método estándar ha sido establecido en adelante en el Annals of the International Geophysical Year (IGY, 1958), lo que requiere que se tomen las lecturas en los momentos de cielos despejados, con el piranómetro con sombra y sin sombra, al mismo tiempo que las lecturas se toman con el pirheliómetro. Es aconsejable que el sombreado se realice por medio de un disco sostenido, 1 m desde el piranómetro con el disco

solo lo suficientemente grande como para sombrear la cubierta de vidrio. La constante de calibración es entonces el cociente de la diferencia en la salida del piranómetro sombreada y sin sombrear a la salida del pirheliómetro multiplicada por la constante de calibración del pirheliómetro $\cos\theta_z$, el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre el piranómetro horizontal. El piranómetro estándar secundario se piensa que tiene una buena aproximación de $\pm 1\%$ cuando se calibra contra un pirheliómetro estándar. La comparación directa de la precisión y los instrumentos de campo se puede hacer para determinar la constante de calibración de los instrumentos de campo. (Duffie y Beckman, 2013).

Un piranómetro produce un voltaje desde los detectores termopila que es una función de la radiación incidente. Es necesario el uso de un potenciómetro para detectar y registrar esta salida. Datos de radiación generalmente deben estar integrados en un periodo de tiempo, como una hora o un día. La integración puede hacerse mediante planimetría o por integradores electrónicos. Se ha estimado que con una calibración frecuente y un uso cuidadoso y razonable del piranómetro, las mediciones de radiación podría ser buenas dentro de $\pm 5\%$; errores de integración incrementarían este número. Muchos de los datos de radiación disponibles antes de 1975 probablemente no son tan buenos, gran parte debido a la calibración poco frecuentes y en algunos casos debido a la insuficiencia de los procedimientos de integración y poca frecuencia de calibración. (Duffie y Beckman, 2013).

Dos tipos adicionales de las mediciones se hacen con Piranómetros: mediciones de la radiación difusa en las superficies horizontales y las mediciones de la radiación solar sobre superficies inclinadas. (Duffie y Beckman, 2013).

Las mediciones de la radiación difusa se pueden hacer con piranómetros sombreando el instrumento de la radiación directa. Esto se hace generalmente por medio de un anillo de sombreado, como se muestra en la figura N° 17.

El anillo es usado para permitir el registro continuo de radiación difusa sin la necesidad de la continua colocación de dispositivos de sombreado más pequeños; los ajustes deben hacerse sólo para el cambio de declinación y pueden hacerse todos los días. El anillo da sombra el piranómetro desde parte de la radiación difusa, y una corrección de este sombreado debe ser estimada y aplicada a la radiación difusa observada (Drummond, 1956, 1964; IGY, 1958; Coulson, 1975).



Figura N° 17. Piranómetro con sombreado de anillo para captar la radiación difusa. (Fuente: Propia, 2016).

2.2.2. Datos de radiación solar

Datos de radiación solar están disponibles de diferentes maneras. La siguiente información acerca de los datos de radiación es importante para su comprensión y uso: saber si son mediciones instantáneas (irradiancia) o los valores integrados sobre un cierto período de tiempo (irradiación) (normalmente hora o día); el tiempo o período de tiempo de las mediciones; si las mediciones son de directa, difusa, o radiación total; los instrumentos utilizados; la orientación de la superficie de recepción (normalmente horizontal, a veces inclinada en una pendiente fija, o normal a la radiación

directa); si es un promedio, el período durante el cual se promediaron (por ejemplo, promedios mensuales de radiación diaria).

La mayoría de estos instrumentos proporciona registros de radiación en función del tiempo y no proporcionan por sí mismas un medio de integración de los registros. Los datos fueron registrados generalmente en una forma similar a la que se muestra en la figura N° 18 y se integraron gráficamente. (Duffie y Beckman, 2013).

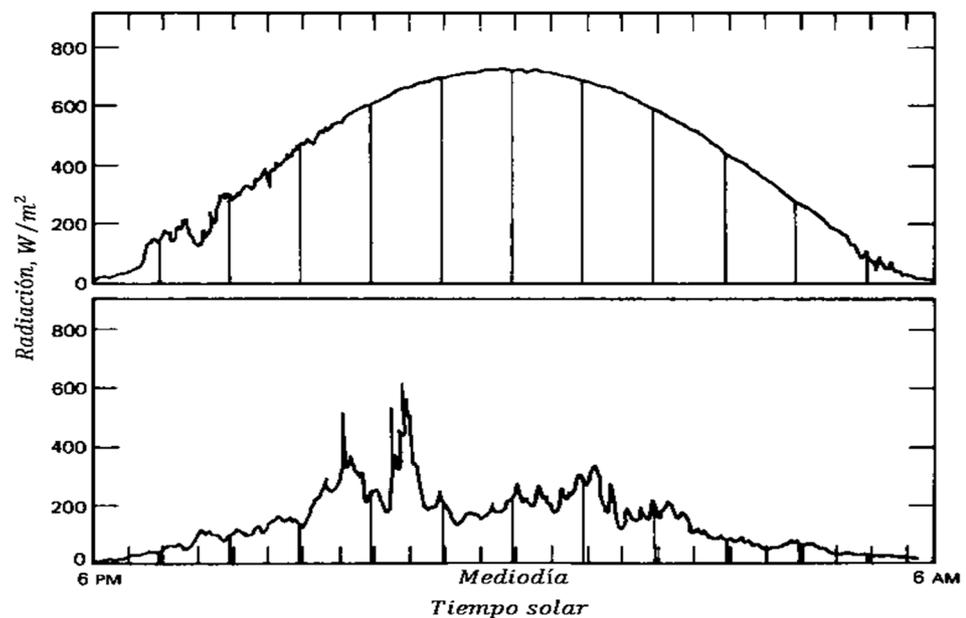


Figura N° 18. Radiación solar total (directa y difusa) sobre una superficie versus el tiempo para día despejado y mayormente nublado, latitud 43°, para días cercano al equinoccio. (Fuente: Duffie y Beckman, 2013)

Las incertidumbres en la integración se suman a las incertidumbres en respuesta al piranómetro; la integración electrónica es ahora muy utilizada. (Duffie y Beckman, 2013)

Hay dos tipos de datos de radiación solar que están ampliamente disponibles. La primera es la radiación total diaria promedio mensual en una superficie horizontal \bar{H} . La segunda es la radiación total por hora sobre una superficie horizontal I , por cada hora durante períodos prolongados, tales como uno o más años. Las

unidades tradicionales son calorías por centímetro cuadrado, las más útiles megajulios por metro cuadrado. Estos datos están disponibles en los servicios meteorológicos (por ejemplo, NSRDB, 1991-2005) y la literatura [por ejemplo de la Commission of the European Communities (CEC) European Solar Radiation Atlas (1984) y otros (1966a, 1966b)]. La OMM patrocina recopilación de datos de radiación solar en el World Radiation Data Center; éstos se publican en Solar Radiation and Radiation Balance Data (The World Network), una publicación anual.

La precisión de algunos de los datos antes (1970) es generalmente menor de lo deseable, debido a que los estándares de calibración y el cuidado en el uso de los instrumentos y la integración no siempre han sido adecuados. Mediciones recientes y las medias basadas en ella son probablemente buenas al $\pm 5\%$. La mayoría de los datos promedio mayores son probablemente no más de $\pm 10\%$, y para algunas estaciones una mejor estimación puede ser $\pm 20\%$. (Duffie y Beckman, 2013)

Para calcular el comportamiento dinámico de procesos y equipo de energía solar y para las simulaciones de operación de proceso a largo plazo, se necesitan datos más detallados de la radiación solar (relacionados con información meteorológica). (Duffie y Beckman, 2013)

2.3. Colectores solares de tubo de vacío

2.3.1. Definición

El colector Solar es el elemento cuya función es captar la energía Solar que incide sobre la superficie y transferirla al fluido. Toda la energía que incide sobre el colector no se considera como útil, de forma que mientras se calienta el fluido de trabajo se generan pérdidas térmicas que será lo que defina el rendimiento del colector. (Reig, 2007)

El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar

(longitudes de onda entre 300 y 3000 *nm*) y es por naturaleza variable con el tiempo. (Salguero, 2008)

Existen muchos tipos de colectores solares, y en esta investigación se eligió los de tubos de vacío. (Reig, 2007)

Cada colector de tubo de vacío consiste en la disposición de tubos en líneas paralelas formadas por un tubo exterior y otro interior o de absorción. Está cubierto mediante una capa que absorbe la energía solar, inhibiendo la pérdida por radiación. Al evacuar el aire y hacerles el vacío en el espacio que existe entre ambos tubos, se evita pérdidas por convección y conducción. Las propiedades aislantes del vacío permiten reducir al mínimo la dispersión del calor al exterior y mantener un buen rendimiento incluso cuando la temperatura exterior es baja. (Reig, 2007)

El vacío entre el tubo y el absorbedor provoca que las pérdidas por convección se puedan considerar nulas cuando la presión en el interior de los captadores es inferior a 10^{-2} *bar*. En cambio, las pérdidas por radiación no disminuyen ya que éstas no dependen de un medio físico para su propagación. Los tubos de vacío se conectan entre sí normalmente en paralelo. (Aven, 2008)

El vacío contribuye no solamente a la reducción de las pérdidas, sino también a minimizar la influencia de las condiciones climáticas (condensación, humedad, etc.) sobre los materiales empleados, evitando su deterioro y mejorando así la durabilidad. (Inygen, 2007).

Los colectores de vacío presentan un coeficiente óptico normalmente comprendido entre 0,6 y 0,8 y un coeficiente de pérdidas generalmente inferior a $1,5 W/m^2K$. Este coeficiente de pérdidas es inferior al de los captadores planos, por lo que estos captadores presentan rendimientos superiores a los de los captadores planos para temperaturas de trabajo elevadas. (Aven, 2008).

Por su forma cilíndrica, aprovechan la radiación de manera más efectiva que los colectores planos, al permitir que los rayos del Sol incidan de forma perpendicular sobre los tubos durante la mayor

parte del día. Estos colectores son hasta un 30 % más eficiente que los colectores planos, pero son bastante costosos, por unidad de superficie pueden costar aproximadamente el doble que un colector de placa plana. Gracias a las propiedades aislantes del vacío, las pérdidas de calor son reducidas y pueden alcanzarse temperaturas en el rango de 77 a 177 °C de esta manera, este tipo de colectores resultan particularmente apropiados para aplicaciones de alta temperatura (Camargo, 2013).

Los colectores solares de tubo de vacío son el resultado de la aplicación de alta tecnología en el diseño, en la fabricación y en la selección de los materiales empleados, con la finalidad de conseguir una elevada eficiencia y rendimiento en su vida útil (Inygen, 2007).

Debido a sus características de colector de alto rendimiento, es un producto estrella en ventas en países con niveles de insolación inferiores al arco mediterráneo como pueden ser Alemania, Suiza y los países centroeuropeos en general, ya que uno de sus atractivos comerciales es el de asegurar rendimiento incluso en días de invierno, nubosos e incluso con lluvia (Inygen, 2007).

2.3.2. Eficiencia de un colector solar

La eficiencia de un colector solar se define como el cociente de la energía térmica útil frente a la energía solar total recibida. Además de las pérdidas térmicas existen las pérdidas ópticas. El factor de conversión u eficiencia óptica indica que porcentaje de los rayos solares que penetran en la cubierta transparente del colector (la transmisión) es absorbido. Básicamente, es el producto de la tasa de transmisión de la cubierta y la tasa de absorción del absorbedor (Ver figura N° 20). Se muestran también las eficiencias por cada tecnología de colector en la figura N° 19. (Placco y otros, 2007)

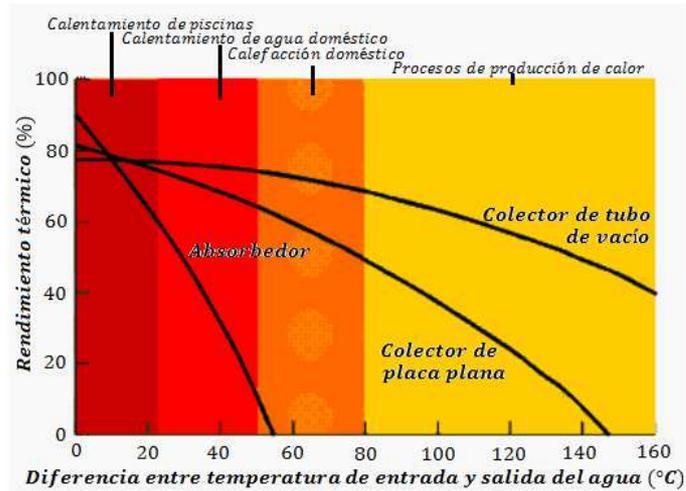


Figura N° 19. Variación del rendimiento para distintos tipos de colectores, en función al gradiente de temperatura entre la entrada y salida del agua. (Fuente: Hormiga solar, 2013)

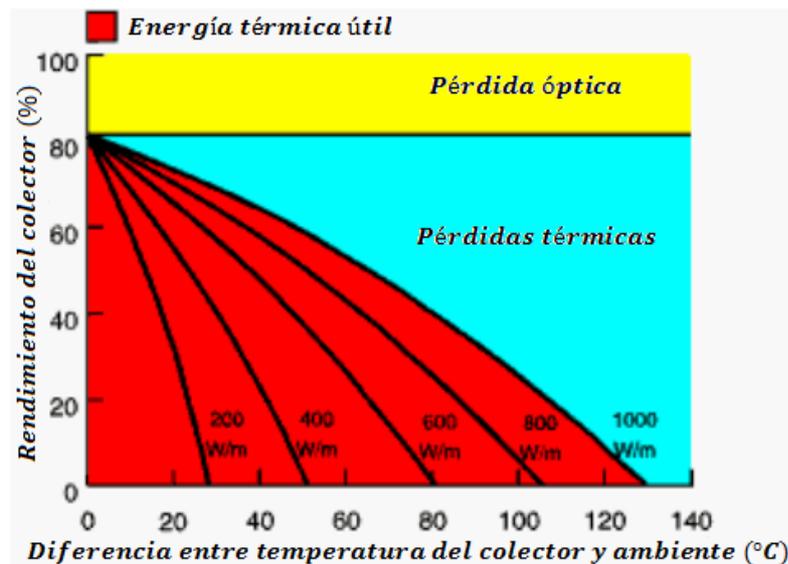


Figura N° 20. Rendimiento de colectores Solares vs diferencia de temperatura entre colector y temperatura ambiente. (Fuente: Hormiga solar, 2013).

En la tabla N° 5 se muestran valores típicos de los parámetros característicos eficiencia óptica (η_0) y coeficiente global de pérdidas (U_L) y rango normal de temperaturas de trabajo para distintos tipos de colectores: (Placco y otros, 2007)

Tabla N° 5. Parámetros característicos de los distintos tipos de colectores solares. Fuente: CENSOLAR (Centro de Estudios de la Energía Solar).

Tipo de Colector	Factor de Conversión (η_0)	Factor de Pérdidas Térmicas U_L ($W/m^2\text{°C}$)	Rango de Temperatura (°C)
Sin Cubierta	0.9	15 – 25	10 – 40
Cubierta Simple	0.8	7	10 – 60
Cubierta Doble	0.65	5	10 – 80
Superficie Selectiva	0.8	5	10 – 80
Tubos de Vacío	0.7	2	10 – 130

2.3.3. Tipos de colectores de tubo de vacío

2.3.3.1. Colector de baja presión o termosifón

El tubo de vacío se encuentra formado por dos tubos concéntricos, entre los cuales se ha producido el vacío a través de la extracción del aire localizado entre ellos (Ver figura N° 21). En el interior se encuentra el absorbedor. (Salguero, 2008)

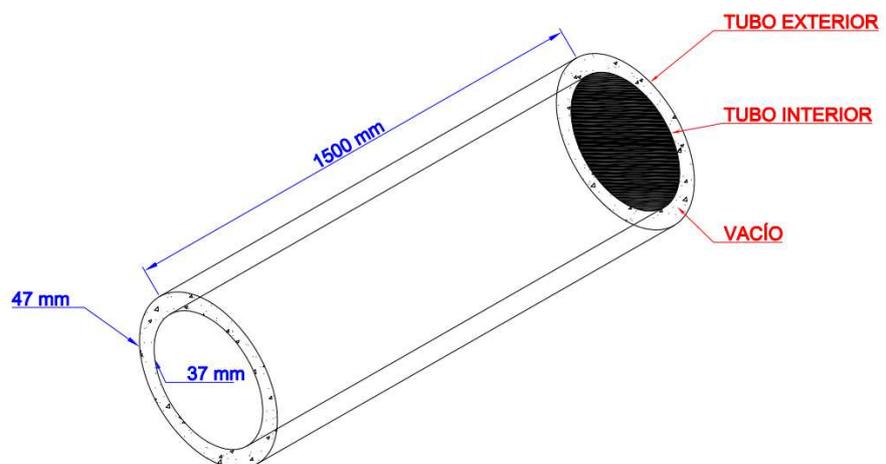


Figura N° 21. Tubo de vacío. (Fuente: Propia, 2016)

En la pared interior del tubo evacuado se sitúa una capa de color oscuro de material absorbente. Cuando la radiación solar incide sobre la capa de material absorbente, se transforma en calor y eleva la temperatura del agua que está en contacto con él. El agua calentada se eleva por convección y comienza a ascender siendo reemplazada por

agua fría que a su vez se calienta y reinicia el proceso. (Salguero, 2008)

Está hecho de una única pieza, de forma que uno de sus extremos es cerrado y el otro abierto, siendo totalmente estanco. En su extremo inferior dispone de un soporte metálico entre ambas capas de vidrio, que le permiten absorber vibraciones. (Flores, 2009)

Este sistema es únicamente utilizado en calentadores solares termosifónicos. Son tubos de vacío ensamblados directamente con el depósito acumulador y que por lo tanto contienen agua. (Salguero, 2008)



*Figura N° 22. Tubo de vacío de baja presión o termosifón.
(Fuente: Propia, 2016)*

Este tipo de tubo de vacío ofrece la ventaja de tener escasas pérdidas de calor, y los inconvenientes de ser muy sensible a la presión y de no ofrecer ninguna protección contra las bajas temperaturas (dilatación del agua al congelarse y rotura de las tuberías de la instalación), Por lo tanto no es posible su utilización en zonas con inviernos fríos, sin la inclusión de un calentador eléctrico que caliente el agua del depósito cuando esta alcanza temperaturas muy bajas. (Salguero, 2008).

- **Principio de funcionamiento del colector solar con tubos de vacío de baja presión**

El colector es el encargado de recibir la energía que emite el Sol en forma de ondas electromagnéticas y transferirla al agua por conducción térmica, los captadores en su mayoría son de color oscuro o coloreados con pinturas como el cromo negro; la función principal de los captadores solares de baja energía es absorber la radiación que produce el Sol, aprovechándola al máximo y evitando que sea conducida o reflejada por fuera del sistema. Por eso cada uno de los tubos colectores tiene en su interior una cámara de vacío que permite que solo pase la radiación, se evite la conducción y la convección térmica al exterior. (Pineda, 2014)

Como se ha demostrado el agua a mayor temperatura disminuye su densidad y por el fenómeno termosifón esta sube y se deposita en el tanque de almacenamiento mientras que el agua fría más densa se precipita en el fondo luego esta agua fría absorbe el calor del captador y el ciclo se repite (figura N° 23). (Pineda, 2014)

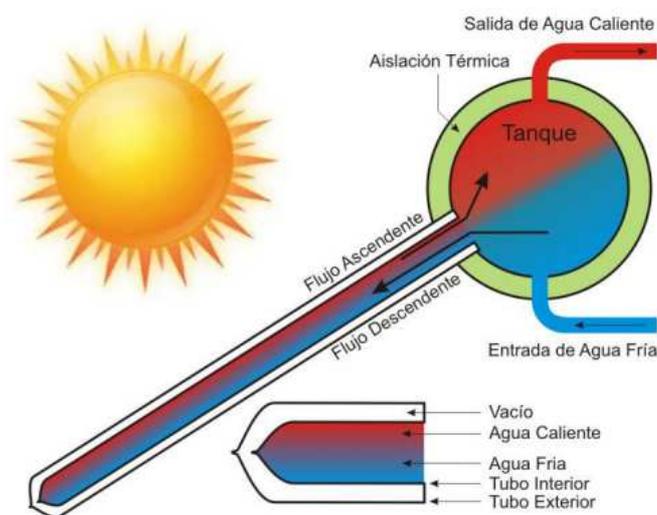
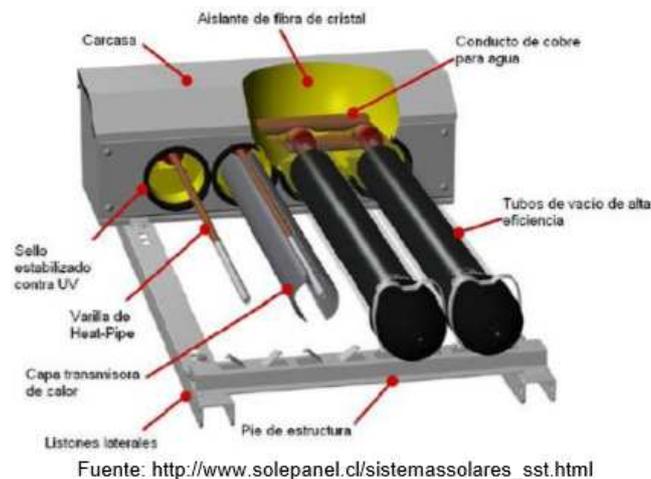


Figura 23. Principio de funcionamiento de un tubo de baja presión. (Fuente: <http://ex000006.ferozo.com/wp-content/uploads/2013/08/esquema-calefon-solar.jpg>)

2.3.3.2. Colector de alta presión o de flujo indirecto o con tubo de calor

Flujo indirecto es cuando hay un fluido que es calentado por el Sol y transfiere el calor mediante un intercambiador al agua de consumo que se encuentra en el depósito acumulador. (Quinteros, 2012). En un tubo de vacío por el extremo abierto se introduce el Heat Pipe o Tubo de Calor, que queda así totalmente envuelto por el tubo de vacío, salvo por un extremo, lo que le permite su conexión al depósito (Ver figura N° 24). (Flores, 2009).



Fuente: http://www.solepanel.cl/sistemassolares_sst.html

Figura N° 24. Colector solar de flujo indirecto. (Fuente: http://www.solepanel.cl/sistemassolares_sst.html)

El tubo de calor, que conceptualmente consiste en un tubo hueco cerrado por los dos extremos, sometido a vacío y con una pequeña cantidad de fluido vaporizante (mezcla de alcohol) en su interior. (Inygen, 2007)

Cuando se calienta la parte del tubo donde se encuentra el fluido, éste se evapora absorbiendo el calor latente de vaporización. Este vapor sube por el tubo hasta alcanzar la parte superior que se encuentra a menor temperatura, produciéndose allí su condensación y la consiguiente liberación de calor latente asociado a este cambio de estado. El líquido retorna por capilaridad o debido a la acción de la

gravedad y el ciclo de evaporación-condensación se repite. (Inygen, 2007)

Este proceso se repite mientras dure la radiación del Sol o hasta que el colector ha alcanzado una temperatura muy alta (de en torno los 130 °C o más). El Heat Pipe o tubo de calor es considerado como un superconductor térmico por lo eficaz de su funcionamiento. (Salguero, 2008). En la figura N° 25 se muestra un tubo de vacío de alta presión.



Figura 25. Tubo de vacío con tubo de calor. (Fuente: Propia, 2016).

Los tubos captadores almacenan una sustancia de trabajo, el calor evapora el fluido, y este transfiere su calor por conducción. (Pineda, 2014)

Esta tecnología permite reducir en gran medida las pérdidas por convección y conducción al quedar el tubo de calor envuelto por el tubo de vacío. Las pérdidas por radiación también se reducen debido a que la capa interior del tubo de vacío incluye un recubrimiento selectivo que impide a su vez que escape la radiación de mayor longitud de onda (efecto invernadero). (Flores, 2009)

Opcionalmente, las características constructivas del modelo tipo “heat pipe” o de condensación y conexas en seco permiten una regulación automática de la temperatura de funcionamiento en el intercambiador a 130° (Inygen, 2007). En la figura N° 26 se muestran los distintos tipos de tubos de vacío de alta presión.



Figura N° 26. Distintos tipos de tubo de calor. (Fuente: Placco y otros, 2007)

Los tubos de calor son considerados como los “superconductores” del calor, debido a su muy baja capacidad calorífica y a su excepcional conductividad (miles de veces superior a la del mejor conductor sólido del mismo tamaño). El uso del tubo de calor está muy extendido en la industria y, basándose en este principio de funcionamiento se fabrican los actuales colectores de vacío con tubo de calor. (Placco, y otros, 2007)

Una ventaja del sistema de tubos de calor sobre el de flujo directo es la conexión "seca" entre el absorbedor y la cabecera, lo que hace más fácil la instalación y también significa que los tubos se pueden cambiar sin vaciar el fluido de todo el sistema. (Placco y otros, 2007)

Este tipo de colectores tienen la ventaja de no sufrir pérdidas por la noche ya que el proceso de transferencia de calor no es reversible (es decir el fluido caliente o el calor no puede pasar del acumulador al tubo y por lo tanto perderse). Además cada tubo es independiente por lo que se puede cambiar en pleno funcionamiento del sistema. Es altamente resistente a las heladas. (Salguero, 2008)

Dado que también pueden girar sobre su eje los tubos, existe la posibilidad de que adopten posiciones verticales y horizontales al igual que ocurre en los sistemas de flujo

directo, aunque en este caso habrá que respetar una inclinación mínima del largo del tubo para permitir que el fluido, una vez licuado, descienda por gravedad. (Salguero, 2008)

- Principio de Funcionamiento

El funcionamiento de estos colectores, se detalla a continuación y se muestra en la figura N° 27: (Salguero, 2008)

- 1) La radiación solar incide en el absorbedor que se calienta y transmite ese calor al tubo.
- 2) El calor recibido provoca que el fluido en el interior del tubo se evapore y ascienda portando energía (calor latente)
- 3) El fluido evaporado cede su calor latente al fluido más frío que circula por el exterior de la cabeza del tubo y al hacerlo se licua (condensa)
- 4) El fluido de nuevo en estado líquido cae por gravedad al fondo del tubo para reiniciar el proceso.

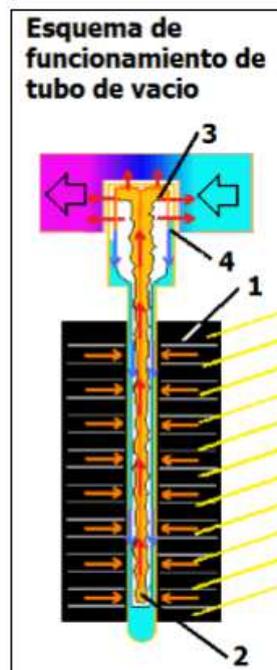


Figura N° 27. Funcionamiento de un tubo de calor. (Fuente: <http://www.sitiosolar.com/colectores%20de%20tubo%20de%20vacio.htm>, 2/03/2008)

Estos tubos de calor presentan como características favorables la alta conductancia térmica equivalente, la facilidad de adecuación de las áreas de transferencia de calor pudiendo adoptar varias formas. Sin embargo su operación está limitada por las propiedades de las sustancias y materiales de construcción, influyendo también la geometría empleada y las condiciones específicas de operación. (Flores, 2009)

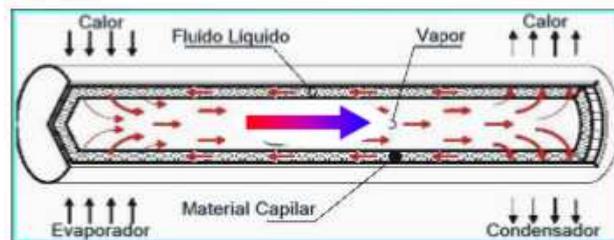


Figura N° 28. Tubo de calor y sus componentes. (Fuente: Flores, 2009).

2.3.3.3. Colector de flujo directo

Es cuando el agua de consumo pasa directamente por el colector. (Quinteros, 2012). En este tipo de colectores, en la placa absorbidora hay insertado un tubo coaxial de intercambio de calor a través del que pasa el medio caloportador, por el principio de contracorriente. (El agua de la red entra por el interior del tubo coaxial y retorna por la cavidad exterior que está en contacto con la placa, elevándose así su temperatura. Como se aprecia en la figura N° 29, los tubos se ensamblan de manera que cada uno de los intercambiadores va conectado a las tuberías de entrada (fría) y salida (caliente). Los tubos del colector pueden girar libremente, facilitando la orientación óptima del absorbedor hacia el Sol ($\pm 25^\circ$). (Inygen, 2007)

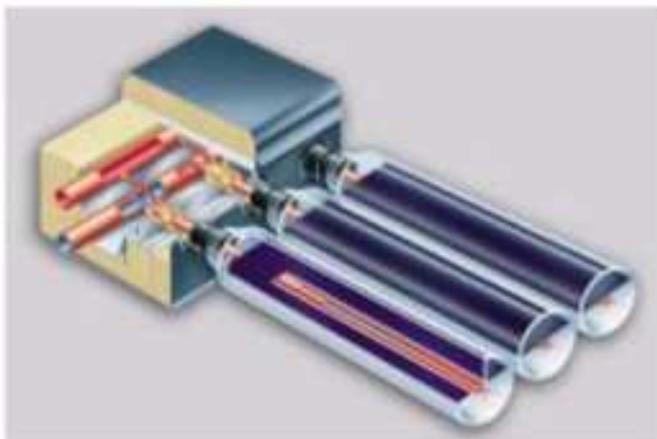


Figura N° 29. Colector de vacío de flujo directo. (Fuente: Placco y otros, 2007)

Consisten en un grupo de tubos de vidrio dentro de cada uno de los cuales hay una aleta de aluminio absorbedor, conectada a un tubo de metal (normalmente cobre) o tubo de vidrio. La aleta posee un recubrimiento selectivo que absorbe la radiación solar, e inhibe la pérdida de calor radiativo. El fluido de transferencia de calor es el agua y se distribuye a través de las tuberías, una para la entrada del líquido y el otro para la salida de fluidos. Los colectores de tubos de vacío de corriente directa vienen en varias variedades de acuerdo al tipo de tubería utilizada. (Placco y otros, 2007)

1. Fluido concéntrico de entrada y salida (vidrio-metal). Estos utilizan un único tubo de vidrio. Dentro de este está la tubería de cobre adosada a la aleta. Este tipo de construcción permite que cada una de las tuberías roten para otorgar el ángulo de inclinación deseado y permitir la máxima absorción en la aleta, aun cuando el colector se monta horizontalmente. El diseño de vidrio y metal es eficiente, pero pueden tener problemas, las diferentes tasas de expansión térmica del vidrio y los tubos de metal pueden hacer que la junta entre ellos se debilite y provocar una pérdida de vacío. Sin el vacío,

la eficiencia de estos colectores no es mejor, y puede ser peor que la de un colector de placa plana.

2. Tuberías de entrada y salida separadas (vidrio-metal). Este es el tipo tradicional de colectores de tubos de vacío. El absorbedor puede ser plano o curvo. Como en el caso del diseño de tubos concéntricos, la eficiencia puede ser muy elevados, sobre todo cuando se requieren temperaturas de trabajo relativamente bajas. La posible pérdida de vacío después de algunos años de funcionamiento vuelve a ser el inconveniente.

3. Dos tubos de vidrio fundido juntos en un extremo (vidrio-vidrio). El tubo interior está revestido con un absorbedor integrado cilíndrico de metal. En general no son tan eficientes como los tubos de vidriometal, pero son más baratos y tienden a ser más confiables. Para aplicaciones de muy alta temperatura, los tubos de vidrio-vidrio pueden ser más eficientes que sus homólogos de vidrio y el metal.

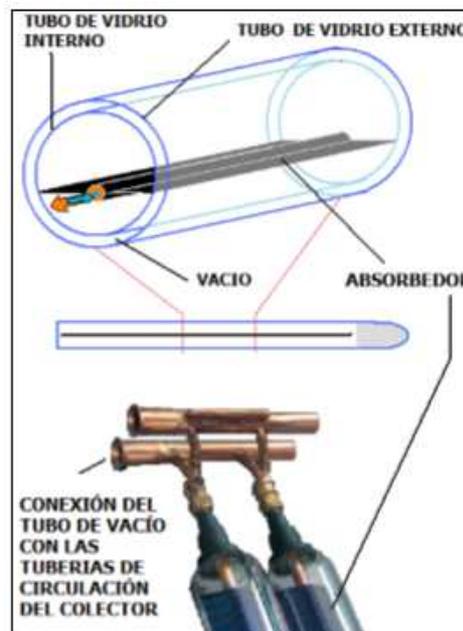


Figura N° 30. Tubo de vacío de flujo directo. (Fuente: <http://www.sitiosolar.com/colectores%20de%20tubo%20de%20vacio.htm>, 2/03/2008)

Los colectores de tubo de vacío de flujo directo, tienen la ventaja de poder adoptar una posición tanto horizontal como vertical sin mermar su rendimiento, ya que el tubo puede rotar sobre su eje, inclinándose el absorbedor de la manera más adecuada. Además de ser utilizable en áreas frías ya que permite usar las estrategias contra la congelación de uso general en la energía solar térmica. (Salguero, 2008)

2.3.3.4. Colector dual o con sistema auxiliar

El calentador dual está constituido por un colector solar de tubos de vacío, un tanque de almacenamiento conectado directamente a los tubos el cual suele estar aislado por poliuretano y dentro de este tanque podemos encontrar una resistencia eléctrica el cual es utilizado como sistema auxiliar, para los días de poca radiación.

La resistencia eléctrica sirve de apoyo para cuando la radiación solar y la temperatura ambiente son bajas y el colector no llega a una temperatura de operación adecuada. (Ver figura N° 31 y 32). (Pineda, 2014)

Para el caso en el que se utilice el sistema auxiliar, este será controlado por un micro controlador electrónico computarizado el cual determinara el uso necesario y eficiente de la resistencia eléctrica. Asimismo se tienen dos tipos diferentes para este caso de calentadores duales, el de baja presión y de alta presión. A continuación se muestra un detalle del tipo de instalación necesario que se tiene que hacer para cada uno de estos dos tipos.

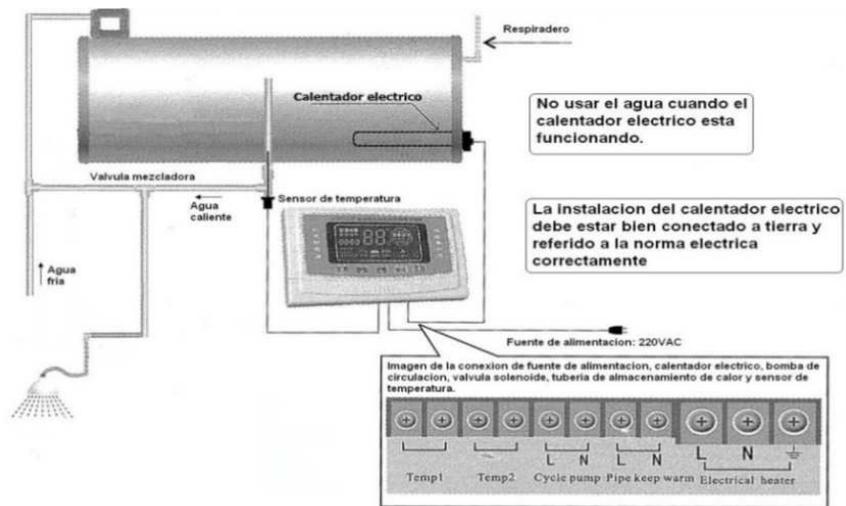


Figura N° 31. Esquema de instalación para un calentador dual de baja presión. (Fuente: Panapex S.A., 2013)

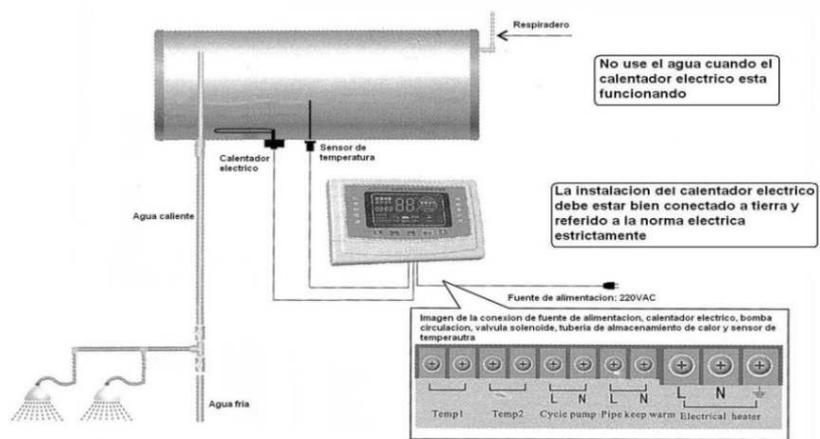


Figura N° 32. Esquema de instalación para un calentador dual de alta presión. (Fuente: Panapex S.A., 2013)

2.4. Teoría para la determinación de la eficiencia horaria de los tubos de vacío de baja y alta presión.

Para la determinación de las eficiencias horarias de estos dos tubos vacío, para el caso del método experimental se utilizarán las mismas ecuaciones, teniendo en cuenta solo la diferencia que existe entre las mediciones de las temperaturas del agua y su masa. (Tang. y otros, 2011)

Para medir la eficiencia de conversión térmica diaria de los Calentadores solares de Agua (SWHs), la radiación diaria captada sobre un colector

de un SWH debe ser conocida, pero esta no puede ser medida directamente por un piranómetro debido al absorbedor tubular y el sombreado entre los tubos solares, por lo tanto un procedimiento matemático debe ser propuesto para estimar la radiación diaria captado sobre un colector de tales SWHs. (Tang. y otros, 2011)

Asumiendo que los SWHs son montados con un ángulo de inclinación β desde el horizonte y ángulo azimut φ medido desde el sur hasta el oeste. Para un colector sin el DFR, la radiación captada por un solo tubo solar del colector en cualquier momento incluye dos componentes: radiación directa interceptada directamente por el tubo, la radiación difusa directamente interceptada por el tubo. La radiación directa interceptada directamente por unidad de longitud de un solo tubo se puede expresar por (Tang. y otros, 2009):

$$I_{t,b} = D_1 I_b \cos \theta_t f(\Omega) \quad (32)$$

Donde D_1 es el diámetro del tubo interior de un tubo solar, I_b es la intensidad de radiación directa instantánea sobre la superficie normal a la radiación, y θ_t es el ángulo entre los rayos solares y la proyección de los rayos solares sobre la sección transversal de los tubos solares y determinado por (Tang. y otros, 2009):

$$\cos \theta_t = \sqrt{n'_x n'_x + n'_y n'_y} \quad (33)$$

Para determinar $\cos \theta_t$ es necesario determinar la posición del Sol en la bóveda celeste. La posición del Sol en la bóveda celeste se describe generalmente por el sistema de coordenadas de horizonte terrestre, en el cual el eje X apunta a la parte superior de la bóveda celeste, eje Y apunta al este, y el eje Z apunta al norte (Ver figura N° 33). En este sistema de coordenadas, el vector unitario de la Tierra al Sol puede ser expresado por Rabl (1981) (Tang y otros, 2009):

$$n_s = (n_x, n_y, n_z) \quad (34)$$

Donde:

$$n_x = \cos \delta \cos \lambda \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda \quad (35)$$

$$n_y = -\cos \delta \sin \omega \quad (36)$$

$$n_z = -\cos \delta \sin \lambda \cos \omega + \sin \delta \cos \lambda \quad (37)$$

Convenientemente para cálculos en este trabajo, se propuso un nuevo sistema de coordenadas, que el plano de coordenadas Y'OZ' se encuentre sobre la superficie de colectores, con el eje X' normal a la superficie del colector y apuntando al sur meridional de la bóveda celeste, el eje Y' es paralelo al horizonte y apuntando al sureste, φ desde el este, y el eje Z' apunta al norte de la bóveda celeste, como se muestra en la figura N° 33. En el sistema de coordenadas propuesto, el vector unitario de la Tierra al Sol puede ser obtenido de n_s basado en la técnica de transformación de sistema de coordenadas como se indica a continuación (Tang y otros, 2009):

$$n'_s = (n'_x, n'_y, n'_z) \quad (38)$$

Donde:

$$n'_x = n_x \cos \beta - (n_y \sin \varphi + n_z \cos \varphi) \sin \beta \quad (39)$$

$$n'_y = n_y \cos \varphi - n_z \sin \varphi \quad (40)$$

$$n'_z = n_z \sin \beta + (n_y \sin \varphi + n_z \cos \varphi) \cos \beta \quad (41)$$

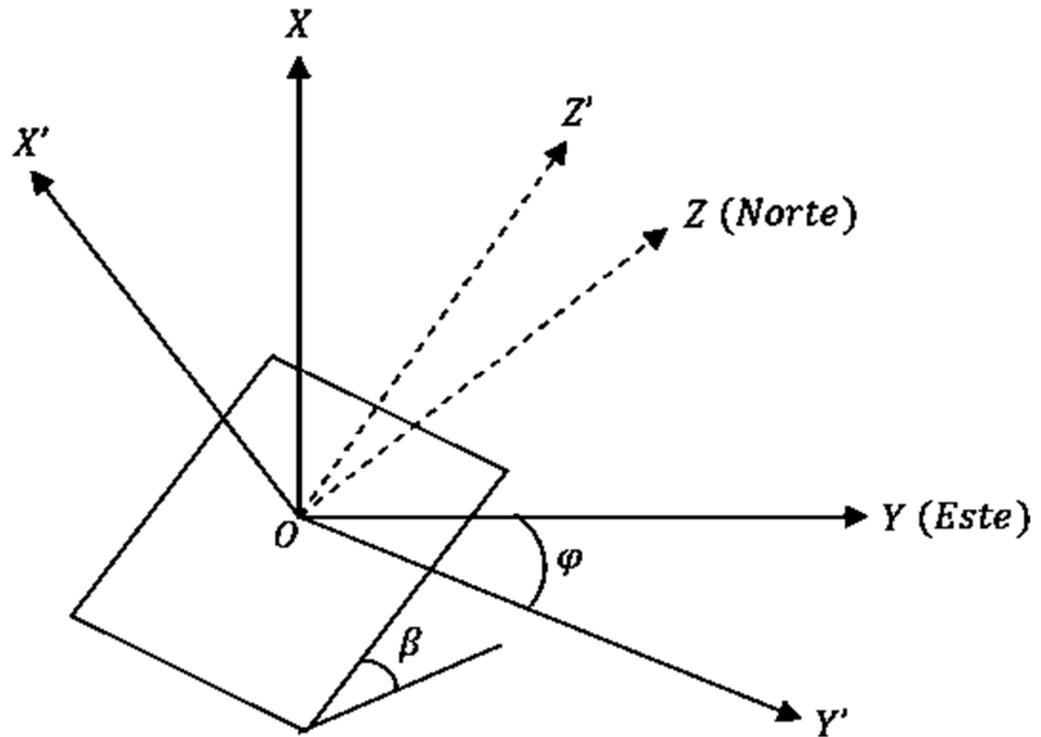


Figura N° 33. Sistema de coordenadas utilizado en este estudio, (Fuente: Tang y otros, 2009)

Donde λ es la latitud del sitio, φ es el ángulo azimut del tubo, β es el ángulo de inclinación del tubo, ω es el ángulo horario solar, determinado mediante la siguiente expresión:

$$\omega = (t_s - 12:00:00) * 15 \quad (42)$$

Donde t_s es el tiempo solar, obtenido por la ecuación 5, el cual es función de la ecuación del tiempo obtenida por la ecuación 6.

La declinación del Sol δ es determinado por Rabl (1985) (Tang y otros, 2009):

$$\sin \delta = -\sin 23,45 \cos[360(n + 10)/365,25] \quad (43)$$

Donde n es el número de días contados desde el primer día de enero.

$f(\Omega)$ de la ecuación 32, es la función de aceptación angular, introducida por considerar el sombreado entre tubos adyacentes, y relacionado a Ω , el ángulo formado por la proyección de rayo solar sobre la sección

transversal del tubo y la normal del colector, como se muestra en la figura N° 34. Para colectores a un ángulo de inclinación, el ángulo Ω , es determinado por (Tang y otros, 2009):

$$\tan \Omega = \left| \frac{n'_y}{n'_x} \right| \quad (44)$$

Conociendo el ángulo Ω , la función de aceptación angular $f(\Omega)$, puede ser determinada por la siguiente expresión:

$$f(\Omega) = \begin{cases} 1, & \Omega \leq \Omega_0 \\ \frac{B}{D_1} \cos \Omega + 0.5 \left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right), & \Omega_0 < \Omega \leq \Omega_1 \\ 0, & \Omega \geq \Omega_1 \end{cases} \quad (45)$$

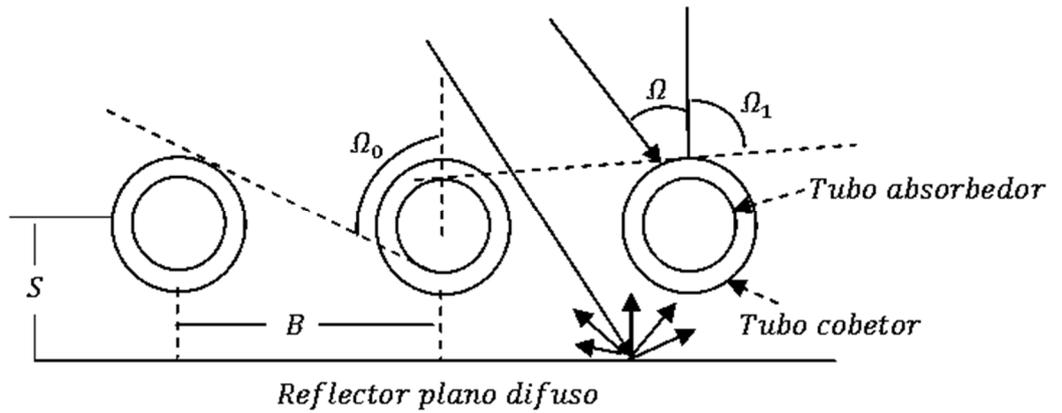


Figura N° 34. Sección transversal de colectores. (Fuente: Tang y otros, 2009)

En la expresión anterior $f(\Omega)$ se establece en 0 cuando $n'_x \leq 0$, lo que implica ninguna incidencia de radiación directa sobre la superficie del colector en el momento. Los ángulos críticos Ω_0 y Ω_1 pueden ser calculados por:

$$\cos \Omega_0 = \frac{D_1 + D_2}{2B} \quad (46)$$

$$\cos \Omega_1 = \frac{D_2 - D_1}{2B} \quad (47)$$

Donde D_2 es el diámetro de cubierta de los tubos solares, B es la distancia entre centros de dos tubos adyacentes.

Para la radiación difusa, la radiación difusa interceptada directamente por unidad de longitud de un tubo puede ser calculado por (Tang y otros, 2009):

$$I_{t,d} = D_1 \pi I_d F_{t-s} \quad (48)$$

Donde $I_{d\beta}$ es la radiación difusa medido, D_1 el diámetro interior del tubo y F_{t-s} determinado mediante la integración de la siguiente expresión (Tang y otros, 2009):

$$F_{T-s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\Omega) d\Omega \quad (49)$$

Conociendo la radiación directa I_b y la radiación difusa horizontal I_d , la radiación captada por unidad de longitud de un solo tubo de un colector en el momento puede ser calculado sumando los dos componentes citados anteriormente de la siguiente manera (Tang y otros, 2011):

$$I_t = D_1 (I_b \cos \theta_t f(\Omega) + \pi I_d F_{t-s}) \quad (50)$$

La radiación horaria captada del SWH en Joule, se calculará por medio de la sumatoria de calores en Joule para un intervalo de tiempo, de la siguiente manera:

$$Q_{horario} = \sum_{n=1}^6 Q_n \quad (51)$$

Donde Q_n se determina mediante el Método del Trapecio y es la radiación en Joules para un intervalo de tiempo y expresado de la siguiente manera:

$$Q_n = NL \left(\frac{I_{n-1} + I_n}{2} \right) \Delta t \quad (52)$$

Donde N es el número de tubos solares en un SWH, L es la longitud de un tubo solar expuesto al aire ambiente, Δt es el intervalo de tiempo de mediciones. Por lo tanto, la eficiencia de conversión térmica horaria del SWH puede ser expresado por:

$$\eta_{horaria} = mC_p(T_f - T_i)/Q_{horario} \quad (53)$$

Donde m es la masa del agua ocupada por el tubo o por el tanque, T_f y T_i son la temperatura final e inicial del agua respectivamente, y $C_p = 4180 \text{ W/kg}^\circ\text{C}$ es el calor específico del agua. Se tiene así mismo que la masa para el caso de baja presión se determina mediante la ecuación $M = \rho V$, donde el volumen es $V = \frac{\pi}{4} D_1^2 L$.

III. MATERIALES, EQUIPOS Y METODOS

3.1. Materiales

- 2 baldes de 20 litros



Figura N° 35. Balde de 20 litros utilizado como tanque de almacenamiento. (Fuente: Propia, 2016)

- 1 tubo de vacío de baja presión

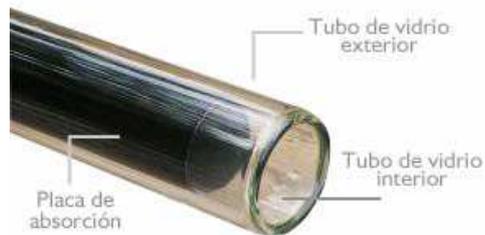


Figura N° 36. Tubo de vacío de baja presión. (Fuente: Propia, 2016)

- 1 tubo de vacío de alta presión



Figura N° 37. Tubo de vacío de alta presión. (Fuente: Propia, 2016)

- 2 Retenes



*Figura N° 38. Reten de tubo de vacío de baja presión y alta presión.
(Fuente: Propia, 2016)*

- 2 termistores



Figura N° 39. Termistores los cuales irán al medio y al fondo en el tubo de vacío de baja presión. (Fuente: Propia, 2016).

- 1 válvula bola con conector



*Figura N° 40. Válvula bola con conector para el desfogue de agua.
(Fuente: Propia, 2016).*

- Tacos de madera



Figura N° 41. Tacos de madera para fijar el tanque de almacenamiento. (Fuente: Propia, 2016)

- Jarra de medición de 2 litros



Figura N° 42. Jarra para medición de litros de agua. (Fuente: Propia, 2016)

- Cubierta de PVC para tubo de vacío



Figura N° 43. Cubierta para evitar que la radiación incida sobre el tubo de vacío. (Fuente: Propia, 2016)

3.2. Equipos

- Sistema de medición de radiación global

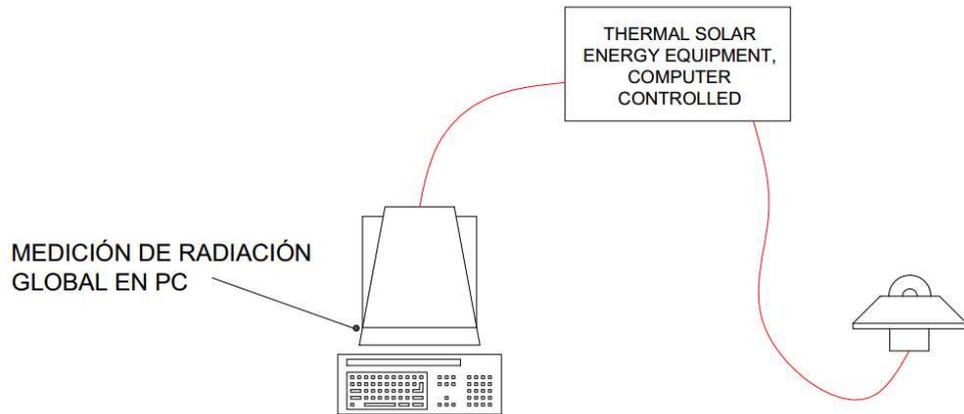


Figura N° 44. Sistema de medición de radiación global, el piranómetro manda señal al equipo de energía solar térmica y este a su vez a la computadora en donde se muestra el valor en el Software LabView 9.1. (Fuente: Propia, 2016)

- Equipo de medición de radiación difusa

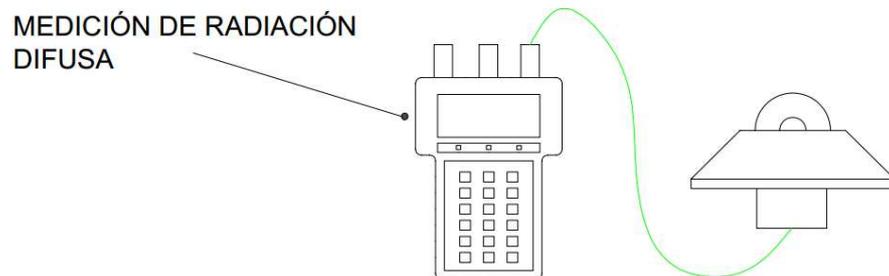


Figura N° 45. Medición de radiación difusa con un Data Logger conectado a un piranómetro con anillo de sombreado. (Fuente: Propia, 2016)

- Cocina eléctrica



Figura N° 46. Cocina eléctrica utilizada para calibración de termistores. (Fuente: Propia, 2016).

- 2 multímetros



*Figura N° 47. Multímetros para medir resistencia de los termistores.
(Fuente: Propia, 2016)*

- Data Logger con 3 termocuplas



Figura N° 48. Data Logger para medir temperaturas durante el experimento. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 49. Termocuplas para medir temperaturas del agua y ambiente. (Fuente: Propia, 2016)

- 1 brújula



Figura N° 50. Brújula para orientar sistema experimental y anillo de sombreado. (Fuente: Propia, 2016)

- 1 inclinómetro



Figura N° 51. Inclinómetro para medir inclinación del tubo y del anillo de sombreado (Fuente: Propia, 2016)

3.3. Métodos

3.3.1. Método de la investigación

Este trabajo es de tipo descriptivo-experimental, los mismos que estarán basados bajo leyes físicas y térmicas.

3.3.2. Procedimiento de la investigación

El procedimiento de la investigación, dado su naturaleza comprenderá el desarrollo y ejecución de las siguientes etapas con el fin de alcanzar lo establecido.

a) *Recopilación de datos geográficos y datos necesarios de especificaciones técnicas del material a ser utilizado como experimento.*

- Los datos geográficos a recopilar son: latitud y longitud.
- Las especificaciones técnicas de los tubos a utilizar son los mostrados en la Tabla N° 6

Tabla N° 6: Especificaciones Técnicas del Tubo de Vacío.
(Fuente: Propia, 2016)

ITEM	CARACTERISTICAS	UNIDAD	VALOR
1	TIPO		SL-1500
2	TIPO DE CONSTRUCCION		Dos tubos de vidrio concéntricos al vacío borosilicato
3	COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA DEL VIDRIO	1/°C	3.3×10^{-6}
4	DIAMETRO EXTERIOR	mm	47
5	DIAMETRO DE LA SUPERFICIE ABSORVEDORA	mm	37
6	TRANSMITANCIA DE LA CUBIERTA		0.91
7	LONGITUD	mm	1500
8	TRATAMIENTO DEL ABSORVEDOR		Grado Al-N/Al pintura selectiva
9	ABSORTANCIA(AM1.5)		≥ 0.9
10	EMITANCIA(80°C)		≤ 0.08
11	PRESION	Pa	$\leq 5 \times 10^{-3}$
12	TEMPERTURA DE ESTANCAMIENTO	°C	≥ 200
13	COEFICIENTE DE PERDIDA DE CALOR	W/(m ² °C)	≤ 0.85
14	RESISTENCIA DE IMPACTO		Resistencia a piedras de granizo de 25mm de diametro
15	PRESION DE PRUEBA	MPa	0.8
16	TIEMPO DE VIDA	años	15



Figura N° 52. Tubos de vacío. (Fuente: Panapex S.A., 2013)

b) *Realizar la adecuación de los tubos de vacío.*

Para la adecuación se realizó lo siguiente:

1. Lo primero que se hizo es preparar el tanque (balde) y hacer los cortes necesarios para insertar el tubo, así como los huecos necesarios para poder llenar el tanque de agua, insertar los materiales para la medición y una válvula de desfogue. Los huecos se hicieron con sierra copa.



Figura N° 53. Señalización en donde irán el tubo, los cables y el punto de admisión del agua. (Fuente: Propia, 2016).



Figura N° 54. Señalización donde ira la válvula de desfogue. (Fuente: Propia, 2016).

2. Se aisló el tanque de manera que le dé la mínima radiación posible, para que no pueda afectar significativamente los valores medidos. Se aisló el tanque con cartón y luego se cubrió toda la superficie con cinta maskintape.



Figura N° 55. Marcación de corte del recubrimiento del tanque. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 56. Tanque recubierto con cartón. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 57. Proceso de forrado del tanque. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 58. Tanque aislado. (Fuente: Propia, 2016)

3. Para la inserción del tubo hacia el tanque se hicieron de diferentes maneras en el de baja presión y alta presión, por lo que se detallan de la siguiente manera:

Baja Presión

- Se hizo la calibración de los 2 termistores, identificándolo por su tamaño, entonces tenemos un termistor pequeño y otro grande, los cuales irán dentro del tubo en la parte media y al fondo respectivamente.



Figura N° 59. Calibración de los termistores. (Fuente: Propia, 2016)

En las figuras N° 60 y 61 se muestran los gráficos para determinar la ecuación de calibración de los termistores, teniendo así la ecuación $T = \frac{3\,268,3}{\ln R + 7,0883}$ para el termistor del medio y la ecuación $T = \frac{3\,366,9}{\ln R + 5,1054}$ para el termistor del fondo.

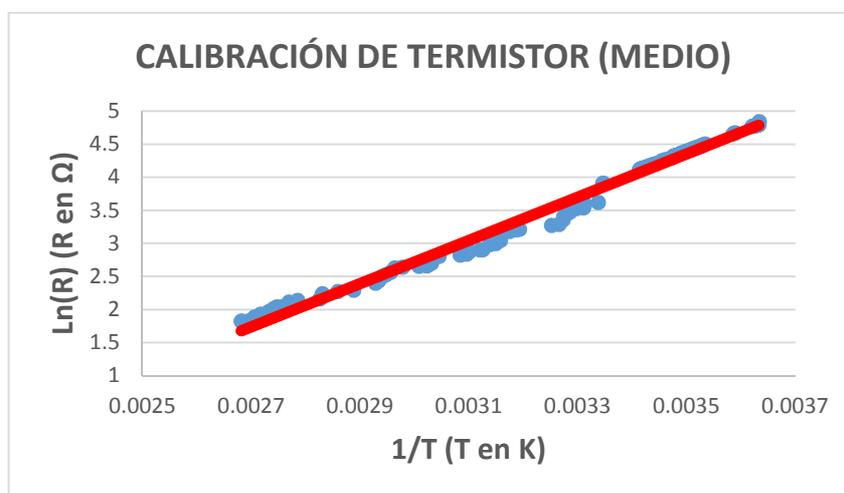


Figura N° 60. Grafico para determinar la ecuación de calibración. (Fuente: Propia, 2016)

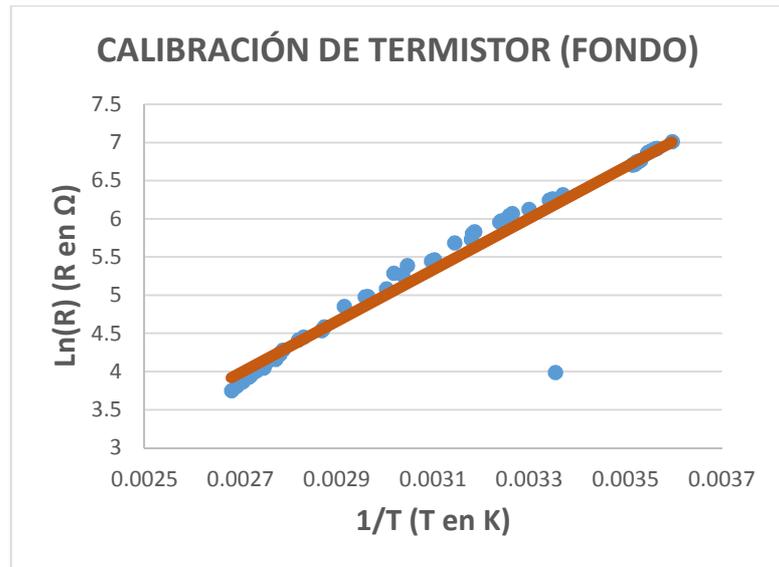


Figura N° 61. Grafico para determinar la ecuación de calibración. (Fuente: Propia, 2016)

- Se insertó el tubo en el tanque a presión con un retén, para evitar las fugas de agua, luego se procedió a instalar los termistores, las termocuplas y se preparó los dos piranómetros para medir radiación global y difusa. Para la medición de la resistencia de los termistores se utilizaron 2 multímetros y para las 3 termocuplas el Data Logger, este último para medir las temperaturas inicial y final del agua. Para instalar el tubo al ángulo adecuado se colocaron ladrillos y para el tanque quede fijo se hicieron 4 tacos de madera. En la figura N° 62 se muestra la adecuación o montaje para el tubo de vacío de baja presión completamente.



Figura N° 62. Adecuación o montaje del tubo de vacío de baja presión. (Fuente: Propia, 2016)

Alta Presión

Lo primero que se tuvo que hacer es preparar el tubo, se le colocó el tubo de calor con aleta dentro del tubo de vacío, luego se hizo una pieza personalizada (brida) de manera que este pueda cerrar el lado extremo abierto del tubo. Para sellar las ranuras entre la pieza y el tubo se utilizó silicona para motores. Luego ya una vez insertado el tubo de vacío de alta presión, por dentro se aseguró esta ranura de separación con goma cojín.

Para medir las temperaturas de entrada y salida del agua se utilizaron 2 termocuplas, conectados a 2 multímetros.



Figura N° 63. Tubo de calor de un tubo de vacío de alta presión. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 64. Tubo de vacío de alta presión con pieza personalizada. (Fuente: Propia, 2016)



*Figura N° 65. Tubo de vacío de alta presión con sellado de silicona de motores para evitar la fuga del agua del tanque.
(Fuente: Propia, 2016)*



Figura N° 66. Tubo de vacío de alta presión insertado en el tanque. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 67. Adecuación o montaje del tubo de vacío de alta presión. (Fuente: Propia, 2016)

4. Preparamos los 2 piranómetros para hacer las mediciones de radiación global y difusa. Para medir la radiación directa se conectó el piranómetro con la PC y así recopilar los datos por medio del Software LabView. Para medir la radiación difusa, el piranómetro se tuvo que hacer sombra por medio de un arco disco, este piranómetro fue conectado al Data Logger, el cual muestra los valores respectivos. El ángulo de inclinación del arco disco es aproximadamente la suma de los valores de la latitud y declinación $\lambda + \delta$, la orientación debe esta sobre los ejes Este-Oeste, hacia el norte.



Figura N° 68. Piranómetro para medir radiación global. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 69. Piranómetro con arco disco para medir radiación difusa. (Fuente: Propia, 2016)



Figura 70. Medición del ángulo de inclinación del arco disco. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 71. Orientación del arco disco, el cual está en los ejes Este-Oeste. (Fuente: Propia, 2016)

c) Adquisición de datos medidos durante el experimento.

Baja Presión

En la figura N° 72 se muestra el esquema con cada punto de medición.

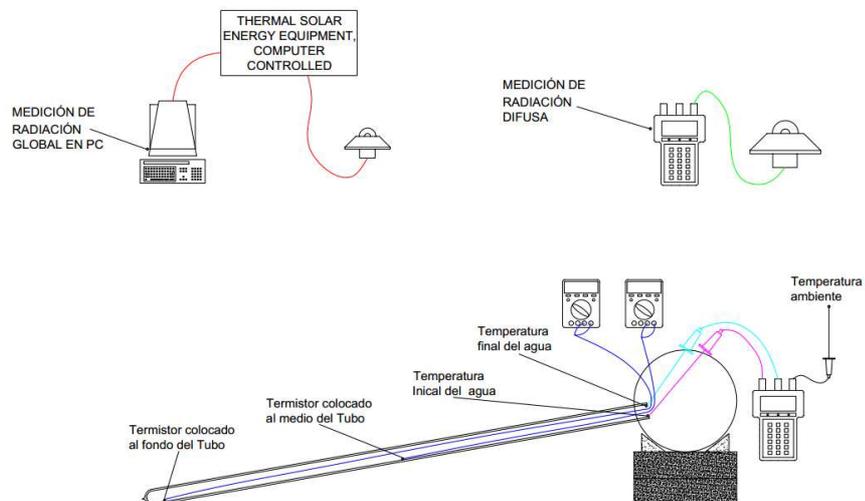


Figura N° 72. Esquema de puntos de medición para un tubo de vacío de baja presión. (Fuente: Propia, 2016)

Para la toma de datos se realizó la siguiente tabla, a fin de obtener los datos necesarios para la determinación de la eficiencia.

Tabla N° 7. Datos generales del tubo de vacío de baja presión. (Fuente: Propia, 2016)

ITEM	DATO	CANTIDAD
1	D1	0,037 m
2	λ	-9,1600 °
3	β	10 °
4	n	105
5	ϕ	0 °
6	Lloc	78,5936 °
7	Lst	75 °
8	ρ (27°C)	996,59 kg/m ³
9	Cp	4 180 J/kg°C
10	Ltubo	1,500 m

Tabla N° 8. Datos de temperaturas tomados durante el experimento. (Fuente: Propia, 2016)

Hora Estandar te	T _i (°C)	T _f (°C)	T _a (°C)
11:10	26,4	35,08	25,59
11:20	27,43	34,53	29,68
11:30	29,59	35,20	29,79
11:40	30,02	36,49	29,90
11:50	29,70	36,88	30,03
12:00	27,33	38,06	30,12
12:10	25,6	38,17	30,23
12:20	28,82	37,98	28,94
12:30	27,16	38,54	29,78
12:40	29,51	38,41	30,45
12:50	26,59	38,52	30,52
13:00	27,50	38,88	30,66
13:10	30,2	39,29	30,79
13:20	26,88	39,56	30,86
13:30	26,11	39,85	30,95
13:40	26,06	40,00	31,02
13:50	26,41	40,26	31,12
14:00	25,68	40,60	31,20
14:10	26,46	40,76	31,29

Tabla N° 9. Datos de radiación tomados durante el experimento.
(Fuente: Propia, 2016)

Radiación Global I (W/m ²)	Radiación Difusa I _d (W/m ²)	Radiación Directa I _b (W/m ²)
903,076	99,8047	803,2713
903,32	98,7061	804,6139
903,198	98,9502	804,2478
903,687	99,8047	803,8823
879,883	98,4141	781,4689
904,785	99,998	804,787
927,368	98,4629	828,9051
952,148	99,9268	852,2212
903,442	98,8281	804,6139
928,345	99,8047	828,5403
927,612	98,877	828,735
905,029	99,4873	805,5417
878,54	98,6328	779,9072
880,127	97,5342	782,5928
831,299	93,3643	737,9347
829,59	98,877	730,713
807,495	98,877	708,618
781,128	98,6328	682,4952
758,057	97,0459	661,0111



Figura N° 73. Toma de datos del experimento. (Fuente: Propia, 2016).

Alta Presión

En la figura N° 74 se muestra el esquema con cada punto de medición.

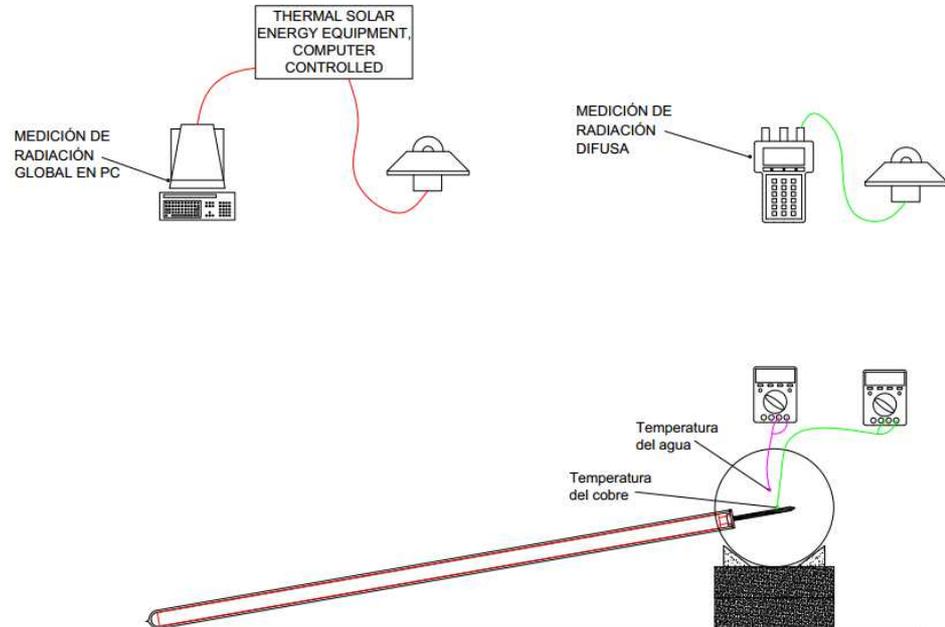


Figura 74. Esquema de puntos de medición para un tubo de vacío de alta presión. (Fuente: Propia, 2016).

Tabla N° 10. Datos generales del tubo de vacío de alta presión. (Fuente: Propia, 2016)

ITEM	DATO	CANTIDAD
1	D1	0,037 m
2	λ	-9,1600 °
3	β	10 °
4	n	138
5	φ	0 °
6	Lloc	78,5936 °
7	Lst	75 °
8	ρ (27°C)	996,59 kg/m ³
9	Cp	4 180 J/kg°C
10	Ltubo	1,500 m

Tabla N° 11. Datos de temperatura tomados en el experimento.
(Fuente: Propia, 2016).

Hora Estandar te	T _{Cu} (°C)	T _{agua} (°C)
11:40	26	28
11:50	40	30
12:00	43	34
12:10	45	36
12:20	47	35
12:30	48	40
12:40	50	41
12:50	51	44
13:00	51	45
13:10	50	43
13:20	50	41
13:30	49	37
13:40	51	42
13:50	49	37
14:00	50	35
14:10	49	34
14:20	48	33
14:30	48	34
14:40	50	34

Tabla N° 12. Datos de radiación tomados en el experimento.
(Fuente: Propia, 2016)

Radiación Global I (W/m ²)	Radiación Difusa I _d (W/m ²)	Radiación Directa I _b (W/m ²)
780,64	148,24	632,4
781,372	145,92	635,452
806,641	143,6	663,041
805,054	144,8	660,254
805,42	143,76	661,66
781,86	139,52	642,34
805,664	136,8	668,864
782,227	136,56	645,667
781,616	134	647,616
805,542	129,76	675,782
800,27	130,4	669,87
794,8	133,2	661,6
799,12	142,64	656,48
773,84	139,76	634,08
755,44	137,6	617,84
733,6	133,28	600,32
705,76	131,2	574,56
675,36	131,76	543,6
654,48	127,36	527,12



Figura N° 75. Toma de datos de temperatura. (Fuente: Propia, 2016)



Figura N° 76. Datos de radiación global tomados en la PC. (Fuente: Propia, 2016)

d) Determinación de las eficiencias de los tubos de vacío.

La determinación de la eficiencia se realizó en el Capítulo IV.

e) Analizar los resultados para comprobar la hipótesis.

Se analizarán los resultados tanto de baja como de alta presión y así poder comparar con la hipótesis y llegar a una conclusión.

3.3.3. Diseño

Utilizaremos el diseño experimental

Datos de entrada	Proceso	Datos de salida
O1	X	O2

Dónde:

O1 – Radiación global y difusa instantánea, temperatura inicial y final del agua, masa del fluido y tiempo de medición.

O2 – Eficiencia de un tubo de vacío de baja y alta presión.

X – Ensayo experimental.

3.3.4. Población y muestra

La población en esta investigación viene a ser única y por lo tanto se toman todos los datos obtenidos de la radiación directa, radiación difusa, temperatura inicial y temperatura final.

3.3.5. Técnicas e instrumentos para obtener los datos

En esta investigación se consideró el empleo de la técnica experimental, así como los datos de temperaturas de entrada y salida del agua, masa del fluido, tiempo de medición, radiación global y difusa, el análisis en estado estacionario. Los instrumentos utilizados fueron piranómetro, software Labview y Termocuplas.

3.3.6. Procedimiento o forma de tratamiento de la información

Los respectivos cálculos hechos con la información dada, se realizó mediante el uso de software como Excel u otros.

3.3.7. Técnicas de procedimiento y análisis de los resultados según las definiciones y técnicas

Para el procesamiento de la información se utilizara un computador así como el empleo de software: Microsoft Word, Excel.

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Baja presión

Mediante el enésimo día del año se obtiene Γ de la ecuación 3, la ecuación del tiempo mediante el valor obtenido de Γ aplicando la ecuación 6 y la declinación mediante la ecuación 43, se tiene la siguiente tabla:

Tabla N° 13. Resultados obtenidos que dependen solo del día del año.

ITEM	DATO	CANTIDAD
1	Γ (rad.)	1,7903
2	δ	9,2932 °
3	Et (minutos)	-0,2364

Para determinar la eficiencia es necesario estimar la radiación total incidente sobre el tubo, esto depende de dos componentes: radiación directa y radiación difusa.

Radiación Directa

Para determinar el valor de la radiación directa utilizaremos la ecuación 32, donde extraemos el valor del D_1 de la Tabla N° 7 e I_b de la Tabla N° 9, correspondiente a la primera medición

$$I_{t,b} = D_1 I_b \cos \theta_t f(\Omega)$$

- Determinación de $\cos \theta_t$

Mediante los datos de la Tabla N° 7 y Tabla N° 13 procederemos a determinar los parámetros necesarios para la determinación de la eficiencia, se detallara el cálculo para el primero valor medido experimentalmente y luego se realizara lo mismo para las siguientes mediciones.

Primero calculamos el valor de t_s el cual es obtenido de la ecuación 5 con un valor de 10:55 hora – minutos, donde L_{st} y L_{loc} extraídos

de la Tabla N° 7 y E de la Tabla N° 13. De la ecuación 42 obtenemos $\omega = -16,25^\circ$.

Teniendo el valor de ω ; extrayendo λ de la Tabla N° 7 y δ de la Tabla N° 13; mediante las ecuaciones 35, 36 y 37 se obtienen $n_x = 0,9097$, $n_y = 0,2762$, $n_z = 0,3103$. Con el resultado de n_x , n_y , n_z , y tomando el valor de β de la Tabla N° 7 se obtienen $n'_x = 0,8420$ y $n'_y = 0,2762$.

Entonces utilizando la ecuación 33 tenemos

$$\cos \theta_t = 0,8861$$

- Determinación de $f(\Omega)$

Para determinar el valor de la función tenemos 3 condiciones según la ecuación 45, por lo que es necesario la determinación de sus ángulos críticos Ω_0 y Ω_1 ; en este caso como solo se dispone de un tubo $B \rightarrow \infty$, obteniendo así el valor de $\Omega_0 = \frac{\pi}{2}$ y $\Omega_1 = \frac{\pi}{2}$. Ahora utilizamos la ecuación 44 que me da un valor de $\Omega = 0,1577$, por lo que tenemos que $\Omega_0 \geq \Omega$, entonces:

$$f(\Omega) = 1$$

Entonces reemplazando D_1 , I_b , $\cos \theta_t$ y $f(\Omega)$ en la ecuación 32 obtenemos:

$$I_{t,b} = 26,3357 \frac{W}{m}$$

Radiación Difusa

Para determinar el valor de la radiación difusa utilizaremos la ecuación 48, donde extraemos el valor del D_1 de la Tabla N° 7 e $I_{d\beta}$ de la Tabla N° 9, correspondiente a la primera medición

$$I_{t,d} = D_1 \pi I_d F_{t-s}$$

- Determinación de F_{t-s}

En este caso utilizaremos la ecuación 49 y lo integramos de 0 a $\pi/2$.

$$F_{T-S} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\Omega) d\Omega$$

Donde $f(\Omega) = 1$, entonces se tiene:

$$F_{T-S} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\Omega = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right)$$

$$F_{T-S} = \frac{1}{2}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 48 tenemos:

$$I_{t,d} = 5,8006 \frac{W}{m}$$

Conociendo la radiación directa y difusa se tiene entonces el valor de la radiación total:

$$I_t = 32,1363 \frac{W}{m}$$

- Determinación de Q_u

El valor de Q_u es el numerador de la ecuación 53, donde $C_p = 4180 J/kg^\circ C$, T_f es la temperatura medida después de 1 hora, T_i es la temperatura inicial de cada hora (Ver Tabla N° 8). La masa se calcula $M = \rho V$, siendo $\rho = 996,59 kg/m^3$ y el volumen es el contenido por el tubo $V = \frac{\pi}{4} D_1^2 L = 1,6073 m^3$, D_1 y L extraídos de la Tabla N° 7. Tenemos así un valor de:

$$Q_u = 79,0777 kJ$$

- Determinación de $Q_{horario}$

Utilizaremos la ecuación 52, aplicamos el método del trapecio para calcular el valor de la radiación en Joule de la siguiente manera:

$$Q_1 = NL \left(\frac{I_{t0} + I_{t1}}{2} \right) \Delta t = 28,8880 \text{ kJ}$$

Donde $N = 1$, $L = 1,5 \text{ m}$, I_{t0} es la radiación total instantánea por unidad longitud del primer dato, I_{t1} es la radiación total instantánea por unidad de longitud del segundo dato (Ver Tabla N° 14) y $\Delta t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$.

Ahora extrayendo los datos de la Tabla N° 14, determinamos el valor de $Q_{horario}$, de la siguiente manera:

$$Q_{horario} = \sum_{n=1}^6 Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

$$Q_{horario} = 172,5044 \text{ kJ}$$

- Determinación de $\eta_{horaria}$

Mediante la ecuación 53 tenemos lo siguiente:

$$\eta_{horaria} = \frac{Q_u}{Q_{horario}}$$

$$\eta_{horaria} = 46\%$$

De esta manera se hizo el cálculo para cada valor tomado durante un tiempo de 3 horas con intervalo de medición de 10 minutos. En la Tabla N° 14 se muestran los resultados obtenidos para cada dato tomado.

Por ultimo extrayendo los datos de las eficiencias horarias, determinamos el promedio el cual da un resultado de **48%**.

Tabla N° 14. Tabla de resultados de los cálculos necesarios para la determinación de la eficiencia de un tubo de vacío de baja presión. Cálculos realizados para el día 14 de abril. (Fuente: Propia, 2016)

t_e (hora: minuto)	t_s (hora: minuto)	$\omega(^{\circ})$	n_x	n_y	n_z	n'_x	n'_y	$\cos(\theta_t)$	$I_{t,b} (W/m)$	$I_{t,d} (W/m)$	$I_t (W/m)$	$Q_n (kJ)$	$Q_u (kJ)$	$\eta_{horaria}$
11:10	10:55	-16,25	0,9097	0,2762	0,3103	0,8420	0,2762	0,8861	26,3357	5,8006	32,1363	28,8880		
11:20	11:05	-13,75	0,9207	0,2346	0,3120	0,8525	0,2346	0,8842	26,3225	5,7367	32,0592	28,8326		
11:30	11:15	-11,25	0,9299	0,1925	0,3135	0,8613	0,1925	0,8826	26,2622	5,7509	32,0131	28,8112		
11:40	11:25	-8,75	0,9372	0,1501	0,3147	0,8684	0,1501	0,8812	26,2113	5,8006	32,0119	28,4325	79,0777	46%
11:50	11:35	-6,25	0,9428	0,1074	0,3156	0,8737	0,1074	0,8802	25,4518	5,7198	31,1715	28,4287		
12:00	11:45	-3,75	0,9465	0,0645	0,3162	0,8772	0,0645	0,8796	26,1914	5,8118	32,0032	29,1114		
12:10	11:55	-1,25	0,9484	0,0215	0,3165	0,8790	0,0215	0,8792	26,9661	5,7226	32,6887			
12:20	12:05	1,25	0,9484	-0,0215	0,3165	0,8790	-0,0215	0,8792	27,7246	5,8077	33,5323	29,7995		
12:30	12:15	3,75	0,9465	-0,0645	0,3162	0,8772	-0,0645	0,8796	26,1858	5,7438	31,9296	29,4579		
12:40	12:25	6,25	0,9428	-0,1074	0,3156	0,8737	-0,1074	0,8802	26,9848	5,8006	32,7854	29,1218	91,9773	52%
12:50	12:35	8,75	0,9372	-0,1501	0,3147	0,8684	-0,1501	0,8812	27,0216	5,7467	32,7683	29,4992		
13:00	12:45	11,25	0,9299	-0,1925	0,3135	0,8613	-0,1925	0,8826	26,3045	5,7821	32,0866	29,1847		
13:10	12:55	13,75	0,9207	-0,2346	0,3120	0,8525	-0,2346	0,8842	25,5142	5,7325	31,2467	28,5000		
13:20	13:05	16,25	0,9097	-0,2762	0,3103	0,8420	-0,2762	0,8861	25,6577	5,6686	31,3264	28,1579		
13:30	13:15	18,75	0,8969	-0,3172	0,3082	0,8297	-0,3172	0,8883	24,2539	5,4263	29,6802	27,4530		
13:40	13:25	21,25	0,8823	-0,3577	0,3058	0,8158	-0,3577	0,8908	24,0837	5,7467	29,8304	26,7798	70,9482	44%
13:50	13:35	23,75	0,8661	-0,3975	0,3032	0,8003	-0,3975	0,8935	23,4273	5,7467	29,1739	26,5519		
14:00	13:45	26,25	0,8481	-0,4365	0,3003	0,7831	-0,4365	0,8965	22,6388	5,7325	28,3713	25,8953		
14:10	13:55	28,75	0,8285	-0,4747	0,2972	0,7643	-0,4747	0,8997	22,0043	5,6403	27,6445	25,2071		

4.2. Alta presión

Mediante el enésimo día del año se obtiene Γ de la ecuación 3, la declinación mediante la ecuación 43 y la ecuación del tiempo mediante el valor de Γ , se tiene la siguiente tabla:

Tabla N° 15. Resultados obtenidos que dependen solo del día del año.

ITEM	DATO	CANTIDAD
1	Γ (rad.)	2,3583
2	δ	19,4117 °
3	Et (minutos)	3,8838

Como en el caso del tubo de baja presión es necesario estimar la radiación total incidente sobre el tubo, por lo que determinaremos la radiación directa y radiación difusa.

Radiación Directa

Para determinar el valor de la radiación directa utilizaremos la ecuación 32, donde extraemos el valor del D_1 de la Tabla N° 10 e I_b de la Tabla N° 12, correspondiente a la séptima medición

$$I_{t,b} = D_1 I_b \cos \theta_t f(\Omega)$$

- Determinación de $\cos \theta_t$

Mediante los datos de la Tabla N° 10 y la Tabla N° 15 procederemos a determinar los parámetros necesarios para la determinación de la eficiencia, se detallara el cálculo para el primero valor medido experimentalmente y luego se realizará lo mismo para las siguientes mediciones.

Calculamos el valor de t_s el cual es obtenido de la ecuación 5 teniendo como resultado el valor de 12:30 hora – minutos, donde L_{st} y L_{loc} extraídos de la Tabla N° 10 y la ecuación del tiempo E de la Tabla N° 13. De la ecuación 42 obtenemos $\omega = 7,5^\circ$.

Teniendo el valor de ω ; tomando λ de la Tabla N° 10 y δ de la Tabla N° 15; mediante las ecuaciones 35, 36 y 37 se obtienen $n_x = 0,8703$, $n_y = -0,1231$, $n_z = 0,4770$. Con el resultado de n_x , n_y , n_z , y tomando el valor de β de la Tabla N° 10 se obtienen $n'_x = 0,7742$ y $n'_y = -0,1231$. Entonces utilizando la ecuación 33 tenemos:

$$\cos \theta_t = 0,7839$$

- Determinación de $f(\Omega)$

Para determinar el valor de la función tenemos 3 condiciones según la ecuación 45, por lo que es necesario la determinación de sus ángulos críticos Ω_0 y Ω_1 ; en este caso como solo se dispone de un tubo $B \rightarrow \infty$, obteniendo así el valor de $\Omega_0 = \frac{\pi}{2}$ y $\Omega_1 = \frac{\pi}{2}$. Ahora utilizamos la ecuación 44 que me da un valor de $\Omega = 0,1577$, por lo que tenemos que $\Omega_0 \geq \Omega$, entonces:

$$f(\Omega) = 1$$

Entonces reemplazando D_1 , I_b , $\cos \theta_t$ y $f(\Omega)$ en la ecuación 32 obteniendo así:

$$I_{t,b} = 19,4007 \frac{W}{m}$$

Radiación Difusa

Para determinar el valor de la radiación difusa utilizaremos la ecuación 48, donde cogemos el valor del D_1 de la Tabla N° 10 e $I_{d\beta}$ de la Tabla N° 12, correspondiente a la séptima medición

$$I_{t,d} = D_1 \pi I_d F_{t-s}$$

- Determinación de F_{t-s}

En este caso utilizaremos la ecuación 49 y lo integramos de 0 a $\pi/2$.

$$F_{T-s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\Omega) d\Omega$$

Donde $f(\Omega) = 1$, entonces se tiene:

$$F_{T-s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\Omega = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right)$$

$$F_{T-s} = \frac{1}{2}$$

Reemplazando los valores de D_1 , $I_{d\beta}$, y F_{t-s} en la ecuación 48 tenemos:

$$I_{t,d} = 7,9507 \frac{W}{m}$$

Conociendo la radiación directa y difusa se tiene entonces el valor de la radiación total

$$I_t = 26,3075 \frac{W}{m}$$

- Determinación de Q_u

El valor de Q_u es el numerador de la ecuación 53, donde $C_p = 4180 J/kg^\circ C$, T_f es la temperatura medida después de 1 hora, T_i es la temperatura inicial de cada hora. La masa se calcula $M = \rho V$, siendo $\rho = 996,59 Kg/m^3$ y el volumen es el contenido por el tanque $V = 0,016 m^3$, D_1 y L extraídos de la Tabla N° 10.

- Determinación de $Q_{horario}$

Utilizaremos la ecuación 52, aplicamos el método del trapecio para calcular el valor de la radiación en Joule para un determinado tiempo, de la siguiente manera:

$$Q_1 = NL \left(\frac{I_{t6} + I_{t7}}{2} \right) \Delta t = 24,3247 \text{ kJ}$$

Donde $N = 1$, $L = 1,5 \text{ m}$, I_{t6} es la radiación total instantánea por unidad longitud del séptimo dato, I_{t7} es la radiación total instantánea por unidad de longitud del octavo dato (Ver Tabla N° 16) y $\Delta t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$.

Ahora extrayendo los datos de la Tabla N° 16, determinamos el valor de $Q_{horario}$, de la siguiente manera:

$$Q_{horario} = \sum_{n=1}^6 Q_n = Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12}$$

$$Q_{horario} = \mathbf{146,4027 \text{ kJ}}$$

- Determinación de $\eta_{horaria}$

Mediante la ecuación 53 tenemos lo siguiente:

$$\eta_{horaria} = \frac{Q_u}{Q_{horario}}$$

$$\eta_{horaria} = \mathbf{46\%}$$

De esta manera se hizo el cálculo para cada valor tomado durante un tiempo de 3 horas con intervalo de medición de 10 minutos. En la Tabla N° 16 se muestran los resultados obtenidos para cada dato tomado.

Cabe resaltar que solo se consideró la eficiencia de la segunda hora de medición debido a que los datos tomados en la primera hora y tercera hora, no mostraron resultados lógicos en cuanto a la eficiencia (Ver Tabla N° 16). Teniendo así el valor de la eficiencia de **46%**.

Tabla N° 16. Tabla de resultados de los cálculos necesarios para la determinación de la eficiencia de un tubo de vacío de alta presión. Cálculos realizados para el día 17 de mayo. (Fuente: Propia, 2016)

t_e (hora: minuto)	t_s (hora: minuto)	$\omega(^{\circ})$	n_x	n_y	n_z	n'_x	n'_y	$\cos(\theta_t)$	$I_{t,b} (W/m)$	$I_{t,d} (W/m)$	$I_t (W/m)$	$Q_n (kJ)$	$Q_u (kJ)$	$\eta_{horaria}$
11:40	11:30	-7,50	0,8703	0,1231	0,4770	0,7742	0,1231	0,7839	18,3431	8,6156	26,9587	24,2297		
11:50	11:40	-5,00	0,8747	0,0822	0,4777	0,7784	0,0822	0,7828	18,4042	8,4808	26,8850	24,4876		
12:00	11:50	-2,50	0,8773	0,0411	0,4781	0,7810	0,0411	0,7821	19,1860	8,3460	27,5319	24,7712		
12:10	12:00	0,00	0,8782	0,0000	0,4783	0,7818	0,0000	0,7818	19,0996	8,4157	27,5153	24,7574	-	-
12:20	12:10	2,50	0,8773	-0,0411	0,4781	0,7810	-0,0411	0,7821	19,1460	8,3553	27,5013	24,3962		
12:30	12:20	5,00	0,8747	-0,0822	0,4777	0,7784	-0,0822	0,7828	18,6037	8,1088	26,7125	24,3288		
12:40	12:30	7,50	0,8703	-0,1231	0,4770	0,7742	-0,1231	0,7839	19,4007	7,9507	27,3515			
12:50	12:40	10,00	0,8641	-0,1638	0,4760	0,7683	-0,1638	0,7856	18,7667	7,9368	26,7035	24,3247		
13:00	12:50	12,50	0,8561	-0,2041	0,4747	0,7607	-0,2041	0,7876	18,8729	7,7880	26,6609	24,0140		
13:10	13:00	15,00	0,8465	-0,2441	0,4731	0,7515	-0,2441	0,7901	19,7562	7,5416	27,2978	24,2814	66,6710	46%
13:20	13:10	17,50	0,8351	-0,2836	0,4713	0,7406	-0,2836	0,7930	19,6557	7,5788	27,2345	24,5395		
13:30	13:20	20,00	0,8221	-0,3226	0,4692	0,7281	-0,3226	0,7964	19,4942	7,7415	27,2357	24,5116		
13:40	13:30	22,50	0,8073	-0,3609	0,4668	0,7140	-0,3609	0,8001	19,4331	8,2902	27,7232	24,7315		
13:50	13:40	25,00	0,7910	-0,3986	0,4642	0,6984	-0,3986	0,8041	18,8650	8,1228	26,9878	24,6199		
14:00	13:50	27,50	0,7730	-0,4355	0,4613	0,6812	-0,4355	0,8085	18,4820	7,9972	26,4792	24,0602		
14:10	14:00	30,00	0,7535	-0,4716	0,4581	0,6625	-0,4716	0,8132	18,0621	7,7462	25,8082	23,5294	-	-
14:20	14:10	32,50	0,7324	-0,5068	0,4547	0,6423	-0,5068	0,8181	17,3927	7,6253	25,0179	22,8718		
14:30	14:20	35,00	0,7098	-0,5410	0,4511	0,6207	-0,5410	0,8234	16,5605	7,6578	24,2183	22,1563		
14:40	14:30	37,50	0,6858	-0,5742	0,4472	0,5977	-0,5742	0,8288	16,1647	7,4021	23,5668	21,5033		

4.3. Efecto de la radiación global sobre las temperaturas dentro del tubo

Mediante el uso de los termistores calibrados, se hizo las mediciones de resistencia al medio y al fondo del tubo, para ver el comportamiento del fluido dentro del tubo, las mediciones son mostradas en la siguiente tabla:

Tabla N° 17. Mediciones de la resistencia del termistor al medio y fondo del tubo de vacío de baja presión, las temperaturas inicial y final del agua, radiación global. (Fuente: Propia, 2016)

G (W/m ²)	R_{fondo} (Ω)	R_{medio} (Ω)	T_{fondo} ($^{\circ}C$)	T_{medio} ($^{\circ}C$)	T_i ($^{\circ}C$)	T_f ($^{\circ}C$)
903.076	365.8	42.1	32.8736	28.8281	26.4	35.08
903.32	364.6	41.9	32.9649	28.9609	27.43	34.53
903.198	360.3	41.3	33.2951	29.3639	29.59	35.20
903.687	355.35	40.8	33.6811	29.7050	30.02	36.49
879.883	347.4	40.1	34.3145	30.1909	29.7	36.88
904.785	340.5	39.7	34.8782	30.4732	27.33	38.06
927.368	332.7	38.45	35.5320	31.3773	25.6	38.17
952.148	329.6	38.2	35.7969	31.5624	28.82	37.98
903.442	325	37.7	36.1955	31.9368	27.16	38.54
928.345	322	37.3	36.4590	32.2405	29.51	38.41
927.612	317.9	36.8	36.8240	32.6258	26.59	38.52
905.029	313	36.2	37.2675	33.0963	27.5	38.88
878.54	308.4	35.7	37.6914	33.4955	30.2	39.29
880.127	305	35.3	38.0095	33.8197	26.88	39.56
831.299	301.1	35	38.3797	34.0658	26.11	39.85
829.59	298.3	34.6	38.6490	34.3977	26.06	40.00
807.495	294.6	34.2	39.0094	34.7343	26.41	40.26
781.128	291.8	33.9	39.2858	34.9898	25.68	40.60
758.057	289	33.6	39.5653	35.2480	26.46	40.76

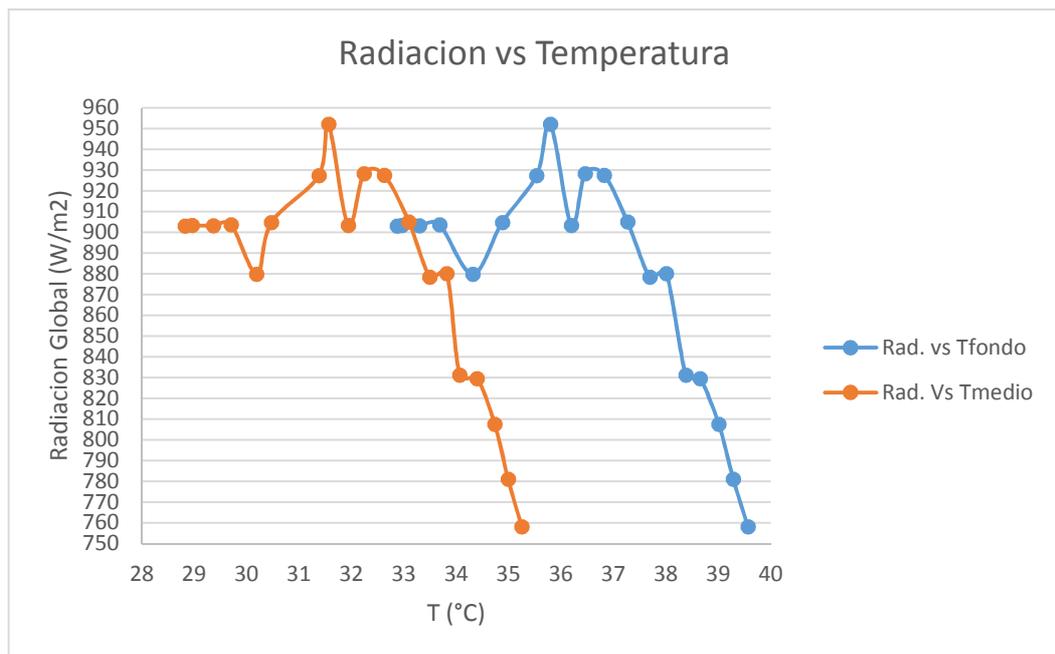


Figura N° 77. Influencia de la radiación con respecto a las temperaturas al medio y fondo del tubo de baja presión. (Fuente: Propia, 2016)

V. CONCLUSIONES

- El modelo físico para determinar la eficiencia de un tubo de vacío de baja presión y alta presión, es el mismo para ambos casos, basándose en geometría solar, transferencia de calor por radiación en 2 dimensiones y calorimetría; todos estos analizados en estado estacionario.
- La construcción o adecuación del sistema experimental se hicieron tal cual son explicados en el punto b) de la sección 3.3.2.
- La ubicación de los datos a tomar durante el experimento son mostrados en la figura N° 42 (tubo de vacío de baja presión) y figura N° 44 (tubo de vacío de alta presión), en donde se detallan los puntos de medición. Así mismo El valor de los datos se muestran en las tablas N° 7, 8, 9, 10, 11 y 12.
- Para el caso de los valores de los datos de temperatura tomados en la tabla N° 11 (tubo de vacío de alta presión), la primera hora y la tercera hora no fueron considerados, debido a que los datos de temperatura de toda el agua contenida no llego a un equilibrio.
- Los calores útiles obtenidos para el tubo de vacío de baja presión fueron 79,0777 kJ; 91,9773 kJ y 70,9482 kJ para la primera, segunda y tercera hora respectivamente. El calor útil para el tubo de vacío de alta presión fue de 66,6710 kJ.
- Las radiaciones horarias para el tubo de vacío de baja presión fueron 172,5044 kJ, 175,5630 kJ y 160,0450 kJ para la primera, segunda y tercera hora respectivamente. La radiación horaria para el tubo de vacío de alta presión fue de 146,4027 kJ.
- Par el tubo de vacío de Baja Presión, la eficiencia horaria en la primera hora tuvo un valor de 46%, en la segunda hora un valor de 52% y en la tercera hora un valor de 44%; teniendo así una eficiencia horaria promedio con un valor de 48%.
- Para el tubo de vacío de alta presión, la eficiencia horaria en la segunda hora de medición tuvo un valor de 46%.
- Para las mediciones de temperatura dentro del tubo de vacío de baja presión, se muestra que estas temperaturas van aumentando siguiendo la circulación por termosifón.

VI. RECOMENDACIONES

- Para el caso de toma de mediciones en el sistema experimental del tubo de vacío de alta presión, tener un equipo especial dentro del agua de manera que este mezcle constantemente el agua durante un tiempo prudencial antes de tomar el dato de temperatura.
- El tanque de almacenamiento esté lo más posible aislado, para evitar que la radiación incidida sobre el tanque y éste influya en el análisis de la eficiencia del tubo.
- Aislar el tubo o que no sea expuesto a la radiación hasta que no se dé inicio la toma de datos experimentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Pineda J. (2014) “Modificación, Evaluación y Análisis de Eficiencia del Colector Solar de Tubos al Vacío Comercial”. Escuela de Tecnología Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Duffie J. y Beckman W. (2013) “Solar Engineering of Thermal Processes”, Cuarta Edición. Solar Energy Laboratory. Editorial Wiley.

Camargo A. (2013) “Diseño y Construcción de un Colector Solar con Botellas Reciclables PET y Análisis Comparativo con otros Colectores”. Escuela de Tecnología Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Tang R., Yang Y. y Gao W. (2011) “Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube Solar water heaters with different collector tilt-angles”. Solar Energy 85, 1381-1389. Yunnan Normal University, China.

Tang R., Gao W, Yu Y. y Chen H. (2009) “Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube Solar collectors”. Energy 34, 1387-1395. Yunnan Normal University, China.

Flores P. (2009) “Evaluaciones Preliminares de un Tubo de Vacío para Terma Solar”. Centro de Energías Renovables y Eficiencia Energética – Universidad Nacional de San Agustín, Perú.

Salguero V. (2008) “Valoración de Colectores Solares Térmicos Planos de Vacío para la Producción de Frio”. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Calor III de Madrid, España.

Placco C., Saravia L. y Cadena C. (2007) “Colectores Solares para Agua Caliente”. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Salta, Argentina.

Reig J. (2007) "Estudio Técnico-Económico de un Sistema de Tubos de Vacío para A.C.S., Calefacción y Refrigeración en una Vivienda Unifamiliar en Alicante". Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, España.

Fang Y., Eames P., Norton B. y Hyde T. (2006) "Experimental validation of a numerical model for heat transfer in a vacuum glazing". Solar Energy 80, 564-577. University of Ulster, Reino Unido.

Sharma S., Iwata T., Kitano H. y Sagara K. (2005) "Thermal Performance of a Solar cooker based on an evacuated tube Solar collector with a PCM storage unit". Solar Energy 78, 416-426. University Osaka, Mie University, Japón.

Esen M. (2004) "Thermal Performance of a Solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants". Solar Energy 76, 751-757. Department of Mechanical Education, Firat University, Turquía.

Balzar A., Stumpf P., Eckhoff S., Ackermann H. y Grupp M. (1996) "A Solar Cooker Using Vacuum-Tube Collectors With Integrated Heat Pipes". PII: S0038-092X, 00024-2. University of Marburgo, Alemania.

SITIOS WEB

- <http://ex000006.ferozo.com/wp-content/uploads/2013/08/esquema-calefon-solar.jpg>
- http://www.solepanel.cl/sistemassolares_sst.html
- <http://www.sitiosolar.com/colectores%20de%20tubo%20de%20vacio.htm>,
2/03/2008
- <http://www.sitiosolar.com/colectores%20de%20tubo%20de%20vacio.htm>,
2/03/2008
- http://fisica.usach.cl/sites/fisica/files/tesis_denisse_quinteros_massardo.pdf
- http://www.inygen.com/docs/infohotel_solar.07.02.pdf
- <http://es.slideshare.net/jesuita297/guia-practica-solartermica2009aven>