



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA DE
SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA
CON COLECTORES SOLARES DE TUBOS
CONCÉNTRICOS”**

**LLANGARÍ LLIGUÍN TATIANA DEL CARMEN.
TINAJERO NOVILLO VICENTE RICARDO.**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2010

Espoch

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

CONSEJO DIRECTIVO

Julio, 01 de 2010

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

LLANGARÍ LLIGUÍN TATIANA DEL CARMEN.

Titulada:

"MODELACIÓN MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE
CALENTAMIENTO DE AGUA CON COLECTORES SOLARES DE
TUBOS CONCÉNTRICOS."

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

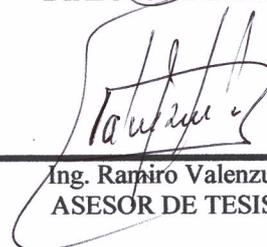


Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:



Ing. Rodolfo Santillán H
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Ramiro Valenzuela
ASESOR DE TESIS

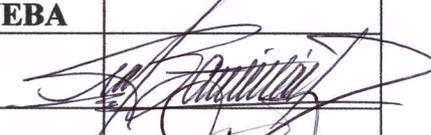
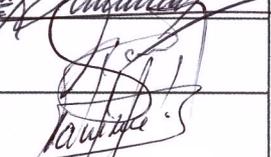
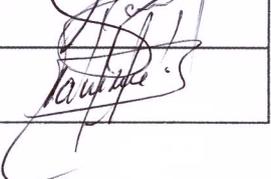
CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: LLANGARÍ LLIGUÍN TATIANA DEL CARMEN

TÍTULO DE LA TESIS: "MODELACIÓN MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON COLECTORES SOLARES DE TUBOS CONCÉNTRICOS."

Fecha de Examinación: Julio, 01 de 2010

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|--------------------------|---------|------------|---|
| ING. Carlos Santillán | ✓ | |  |
| ING. Rodolfo Santillán H | ✓ | |  |
| ING. Ramiro Valenzuela | ✓ | |  |

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.



f) Presidente del Tribunal



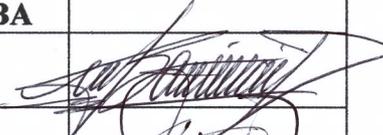
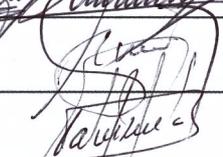
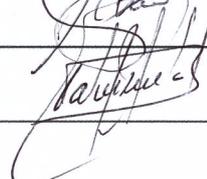
CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: TINAJERO NOVILLO VICENTE RICARDO

TÍTULO DE LA TESIS: "MODELACIÓN MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON COLECTORES SOLARES DE TUBOS CONCÉNTRICOS."

Fecha de Examinación: Julio, 01 de 2010

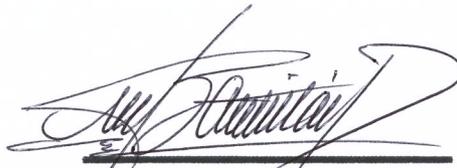
RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|--------------------------|---------|------------|---|
| ING. Carlos Santillán | ✓ | |  |
| ING. Rodolfo Santillán H | ✓ | |  |
| ING. Ramiro Valenzuela | ✓ | |  |

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.



f) Presidente del Tribunal

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



f) Llangari Lliguin Tatiana del Carmen



f) Tinajero Novillo Vicente Ricardo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a mi director de tesis Ing. Rodolfo Santillán, a mi asesor de tesis Ramiro Valenzuela, por la ayuda para la culminación de éste trabajo.

Y en especial para mis padres y hermanas que han sido mi inspiración para culminar con éxito mi carrera.

Tatiana Llangarí

Agradezco a Dios por darme la fortaleza y la valentía suficiente para superar las cosas difíciles que se han presentado en mi vida estudiantil. A todos y cada uno quienes hacen la Escuela de Ingeniería Mecánica.

De manera especial a mi padre que con su ejemplo, dedicación y constancia ha sido la inspiración y fuerza necesaria para culminar esta etapa de mi vida. A mis hermanos por apoyarme en todo momento.

Ricardo Tinajero

DEDICATORIA

A las personas que toda mi vida me han apoyado mis padres: Jacinto y Socorro, por tener la oportunidad de seguir adelante en busca de un mejor mañana, por brindarme todo su amor. A mis hermanas: Valeria y Carolina las que siempre me han entendido y me han ayudado para salir de las situaciones más difíciles. A la persona que siempre me ha brindado su apoyo y amor Ricardo.

A mis amigos y amigas que de una u otra manera supieron apoyarme en esta etapa de mi vida.

Tatiana Llangari

A las personas que confiaron en mí por su apoyo incondicional a mi padre José y hermanos Lucia, José, Cristina, Alejandrita que han sido ejemplo de superación y constancia.

Todo lo que soy se lo debo a ustedes les dedico esta meta alcanzada y les agradezco por ser quienes son. A Taty por su apoyo y amor que me ayudado tanto.

A mis amigos y amigas que me apoyaron en esta etapa importante de mi vida.

Ricardo Tinajero

TABLA DE CONTENIDOS



| <u>CAPÍTULO</u> | <u>PÁGINA</u> |
|---|---------------|
| 1. GENERALIDADES INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | |
| 1.1 Justificación..... | 1 |
| 1.2 Antecedentes..... | 3 |
| 1.3 Objetivos..... | 7 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 7 |
| 1.3.2 Objetivos específico..... | 7 |
| 2. MARCO TEÓRICO | |
| 2.1 Generalidades sobre la energía solar..... | 9 |
| 2.2 El sol..... | 10 |
| 2.3 Formas de energía radiante..... | 11 |
| 2.4 Métodos para determinación del potencial solar..... | 12 |
| 2.5 Atlas solar del Ecuador..... | 15 |
| 2.6 Aplicaciones térmicas de la energía solar..... | 18 |
| 2.7 Principio de funcionamiento del colector..... | 22 |

3. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA ENERGÉTICO

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1. | Recurso solar disponible en Riobamba..... | 27 |
| 3.1.1 | Variables físicas: temperatura, viento..... | 33 |
| 3.2 | Recurso energético disponible..... | 35 |
| 3.2.1 | Cálculo del potencial solar..... | 35 |
| 3.3 | Demanda energética..... | 38 |
| 3.3.1 | Demanda energética en la ciudad de Riobamba..... | 42 |

4. MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ESTANDARIZACIÓN DE EQUIPOS

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Parámetros del diseño del sistema..... | 46 |
| 4.2 | Modelo matemático..... | 47 |
| 4.2.1 | Suposiciones del modelo matemático..... | 47 |
| 4.3 | Calor total admitido..... | 47 |
| 4.3.1 | Calor útil..... | 50 |
| 4.3.2 | Perdidas de energía..... | 51 |
| 4.3.3 | Eficiencia..... | 60 |
| 4.4 | Estandarización del sistema térmico..... | 63 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 5. | FUNCIONAMIENTO Y COSTOS DEL EQUIPO | |
| 5.1 | Esquemas de sistema de calentamiento de agua..... | 68 |
| 5.2 | Posición e inclinación del equipo..... | 71 |
| 5.3 | Instalación del sistema..... | 71 |
| 5.3.1 | Partes del equipo..... | 77 |
| 5.3.2 | Herramientas a utilizar..... | 72 |
| 5.3.3 | Manual de instalación..... | 72 |
| 5.3.4 | Mantenimiento del equipo..... | 79 |
| 5.4 | Pruebas y funcionamiento del sistema..... | 80 |
| 5.4.1 | Comparación de los cálculos del modelo matemático con los datos obtenidos en las pruebas realizadas..... | 88 |
| 5.5 | Curva de eficiencia del sistema..... | 91 |
| 5.6 | Análisis comparativo de los materiales..... | 93 |
| 5.6.1 | Análisis de los materiales aislantes para el reservorio.... | 94 |
| 5.6.1.1 | Pérdidas de calor..... | 94 |
| 5.6.2 | Análisis de las planchas reflectoras..... | 102 |
| 5.7 | Estudio de costos..... | 105 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.7.1 | Generalidades..... | 105 |
| 5.7.2 | Costos directos..... | 106 |
| 5.7.3 | Costos indirectos..... | 109 |
| 5.7.4 | Costos totales del proyecto..... | 110 |
| 5.8 | Valor actual neto y tasa interna de retorno..... | 111 |
| 5.9 | Rentabilidad del proyecto..... | 114 |
| 5.9.1 | Análisis del punto de equilibrio..... | 115 |

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | | |
|-----|----------------------|-----|
| 6.1 | Conclusiones..... | 117 |
| 6.2 | Recomendaciones..... | 121 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

LINKOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

| <u>TABLA</u> | | <u>PÁGINA</u> |
|---------------------|---|----------------------|
| 2.1 | COMPOSICIÓN APROXIMADA DEL BOROSILICATO..... | 26 |
| 3.1 | HELIOFANÍA PROMEDIO DE RIOBAMBA..... | 28 |
| 3.2 | RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA..... | 31 |
| 3.3 | PICOS DE RADIACIÓN EN RIOBAMBA..... | 32 |
| 3.4 | TEMPERATURA AMBIENTE DE RIOBAMBA..... | 34 |
| 3.5 | VELOCIDAD DE VIENTO DE RIOBAMBA..... | 34 |
| 3.6 | DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA..... | 41 |
| 3.7 | CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA..... | 44 |
| 4.1 | DATOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA..... | 61 |
| 4.2 | RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO..... | 62 |
| 4.3 | ESTANDARIZACIÓN (ÁREA)..... | 64 |
| 4.4 | ESTANDARIZACIÓN (N° DE TUBOS)..... | 66 |
| 5.1 | TEMPERATURA DEL AGUA EN UN DÍA SOLEADO..... | 82 |
| 5.2 | TEMPERATURA DEL AGUA EN UN DÍA CLARO..... | 84 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3 | TEMPERATURA DEL AGUA EN UN DÍA NUBLADO..... | 86 |
| 5.4 | DATOS PARA LA VARIACIÓN DEL ΔU | 90 |
| 5.5 | EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR..... | 92 |
| 5.6 | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS AISLANTES | 101 |
| 5.7 | CALOR PÉRDIDO POR EL AISLANTE..... | 102 |
| 5.8 | EMISIVIDAD DE ALGUNOS MATERIALES..... | 104 |
| 5.9 | COSTOS DE LOS MATERIALES..... | 107 |
| 5.10 | COSTOS DE MANO DE OBRA..... | 107 |
| 5.11 | COSTOS DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS..... | 108 |
| 5.12 | COSTOS DE TRANSPORTE..... | 108 |
| 5.13 | COSTO TOTAL DIRECTO..... | 108 |
| 5.14 | COSTO INGENIERIL..... | 109 |
| 5.15 | COSTO TOTAL INDIRECTO..... | 110 |
| 5.16: | COSTOS DEL PROYECTO | 112 |
| 5.17 | ANÁLISIS DEL VAN..... | 113 |

LISTA DE FIGURAS

| <u>FIGURA</u> | <u>PÁGINA</u> |
|---|----------------------|
| 1.1 Dos procesos diferentes de calentamiento de agua..... | 5 |
| 1.2 Tubos al vacío..... | 6 |
| 2.1 Atlas del Ecuador. Insolación difusa promedio..... | 16 |
| 2.2 Atlas del Ecuador. Insolación directa promedio..... | 17 |
| 2.3 Atlas del Ecuador. Insolación global promedio..... | 17 |
| 2.4 Colector de tubos al vacío termosifón..... | 22 |
| 2.5 Colectores placa plana con los de tubos al vacío..... | 23 |
| 2.6 Funcionamiento del colector..... | 23 |
| 2.7 Partes del tubo evacuado..... | 25 |
| 3.1 Sensores de la estación meteorológica..... | 29 |
| 3.2 Partes de la estación meteorológica..... | 29 |
| 3.3 Consola..... | 30 |
| 3.4 Consola. Radiación solar..... | 30 |
| 3.5 Radiación máxima momentánea..... | 32 |
| 3.6 Consumo total de energía..... | 45 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.1: | Temperaturas..... | 51 |
| 4.2 | Circuito térmico equivalente..... | 52 |
| 4.3 | Resistencias térmicas que producen pérdidas..... | 52 |
| 4.4 | Estandarización (área - 20 personas)..... | 65 |
| 4.5 | Estandarización (área – 200 personas)..... | 65 |
| 4.6 | Estandarización (N° de tubos - 20 personas)..... | 67 |
| 4.7 | Estandarización (N° de tubos - 200 personas)..... | 67 |
| 5.1 | Estructura soporte y placas reflectoras..... | 68 |
| 5.2 | Estructura soporte en conjunto con el reservorio..... | 68 |
| 5.3 | Estructura, reservorio, y tubos y empaques..... | 69 |
| 5.4 | Colocación de los tubos de borosilicato en el equipo.... | 69 |
| 5.5 | El equipo con el reservorio de agua fría..... | 70 |
| 5.6 | Colector solar con sus conexiones..... | 70 |
| 5.7 | Herramientas..... | 72 |
| 5.8 | Ensamble estructura..... | 72 |
| 5.9 | Colocación de las planchas de aluminio..... | 73 |
| 5.10 | Montaje de las patas..... | 73 |
| 5.11 | Reservorio aislado..... | 74 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.12 | Reservorio aislado colocado en la estructura..... | 75 |
| 5.13 | Tubos al vacío con empaques..... | 75 |
| 5.14 | Montaje de los tubos al vacío..... | 76 |
| 5.15 | Montaje del reservorio de agua fría..... | 77 |
| 5.16 | Tuberías de agua fría..... | 77 |
| 5.17 | Tuberías de agua caliente..... | 78 |
| 5.18 | Calentamiento del agua – tiempo (alta insolación).... .. | 83 |
| 5.19 | Pendiente de la curva para día soleado..... | 83 |
| 5.20 | Calentamiento del agua – tiempo (media insolación)..... | 85 |
| 5.21 | Pendiente de la curva para día claro..... | 85 |
| 5.22 | Calentamiento del agua – tiempo (baja insolación)..... | 87 |
| 5.23 | Pendiente de la curva para día nublado..... | 87 |
| 5.24 | Eficiencia del colector solar..... | 93 |
| 5.25 | Corte del reservorio..... | 94 |
| 5.26 | Circuito térmico equivalente en el reservorio..... | 94 |
| 5.27 | Perdida de calor vs espesor del aislante..... | 103 |
| 5.28. | Emisividad de los cuerpos..... | 104 |
| 5.29 | VAN – Interés %..... | 113 |

SIMBOLOGÍA

| | |
|------------|--|
| Θ | Ángulo de incidencia de la radiación solar |
| α | Absortividad de radiación de un cuerpo |
| τ | Transmisibilidad de radiación de un cuerpo |
| ϵ | Emisividad de radiación de un cuerpo |
| σ | Constante de Stefan Boltzmann |
| F_{1-2} | Factor de visión del cuerpo 1 al cuerpo 2 |
| γ | Viscosidad cinemática |

LISTA DE ABREVIACIONES

| | |
|-------------|--|
| ACS | Agua caliente sanitaria |
| G_D | Radiación solar directa |
| G_d | Radiación solar difusa |
| GLP | Gas licuado de petróleo |
| GPS | Sistema de posicionamiento mundial (Global Positioning System) |
| G_{SOLAR} | Energía solar por unidad de área |
| IEO | International Energy Outlook |
| Inecel | Instituto Ecuatoriano de Electrificación |
| NREL | Laboratorio Nacional de Energías Renovables (National Renewable Energy Laboratory) |
| OCDE | Organización para la cooperación y desarrollo económico |
| TIR | Tasa interna de retorno |
| VAE | Valor actual de egresos |
| VAI | Valor actual de ingresos |
| VAN | Valor actual neto |

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1** Datos técnicos de los tubos al vacío
- ANEXO 2** Absortividad y emisividad solar a temperatura ambiente
- ANEXO 3** Propiedades del borosilicato
- ANEXO 4** Propiedades de los materiales aislantes
- ANEXO 5** Propiedades del agua saturada
- ANEXO 6** Factores de visión
- ANEXO 7** Absortividad solar de superficies
- ANEXO 8** Emisividades normales
- ANEXO 9** Propiedades de los materiales sólidos
- ANEXO 10** Propiedades del aire

RESUMEN

El trabajo investigativo sobre la Modelación Matemática de Sistemas de Calentamiento de Agua con Colectores Solares de Tubos Concéntricos consta de:

Justificación del proyecto y objetivización del mismo. Tiene un sustento teórico que permite conocer las ventajas y desventajas de sistemas de calentamiento de agua.

Se recopiló las variables físicas: temperatura y velocidad del viento; el recurso solar, al comparar este con la demanda energética se determina teóricamente el área del panel solar a utilizar.

En la modelación matemática se consideró los factor óptico y térmico, se determina la eficiencia del sistema, obteniendo un 71%, valor considerado alto y que permitió la estandarización de sistemas solares para calentamiento de agua.

La estandarización consistió en determinar el área del colector solar en función de dos variables: número de usuarios y radiación solar disponible, esta estandarización es de uso doméstico y comercial con una radiación incidente entre 200 y 1000 W/m², valores representativos para el Ecuador.

Con las pruebas de funcionamiento del colector solar, se tabuló y graficó la variación de temperatura del agua en función del tiempo; se determinó la eficiencia del colector para diferentes intensidades de radiación, se realizó un análisis comparativo en los materiales a ser utilizados para el aislante y para las placas reflectoras.

El equipo se amortiza en 3 años para una familia 4 personas, con uso de 200 litros de agua temperada al día y temperatura de 40 °C con una área de 1,15m² que tiene un costo de 500 dólares.



SUMMARY

The investigation work on the mathematical modeling of water heating systems with solar collectors of concentric tubes consist of:

Project justification and objectivization; it has a theoretical support which permits to know about the advantages and disadvantages of water heating systems.

Physical variables were collected: temperature and wind velocity; upon comparing the solar resource to the energy demand the solar panel area to be used is determined theoretically.

In the mathematical modeling the optical and thermal factors are considered and the system efficacy is determined resulting in 71 %, a value considered to be high which permitted the solar system standardization for water heating.

The standardization consists of determining the solar collector area in function of two variables: user number and available solar radiation, this standardization is for domestic and commercial uses with an incident radiation of 200 to 1000 W/m^2 , significant values for Ecuador.

With the functioning tests of the solar collector, the water temperature variation in function of time was tabulated and illustrated; the collector efficiency for different radiation intensities was determined; a comparative analysis in the materials to be used for the isolator and reflecting plates was carried out.

The equipment is paid in three years for a 4 people family with the use of 200 l, temperature water per day and a temperature of 40°C with an area of 1,15 m^2 and a cost of 500 dollars.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES, INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA, SOCIAL, ECONOMICA Y AMBIENTAL

Durante muchos millones de años el clima de la tierra se ha mantenido a temperatura media relativamente estable, lo que ha permitido el desarrollo de la vida. (30)

Sin embargo, en los últimos 50 años, las concentraciones de gases de invernadero están creciendo rápidamente como consecuencia de la acción humana. El uso generalizado de los combustibles fósiles, el debilitamiento de la capa de ozono y la destrucción de las masas forestales están favoreciendo el aumento de la temperatura de la tierra, provocando cambios drásticos en el clima mundial y haciéndolo cada vez más impredecible.(30)

Las fuentes alternas de energía representan potenciales energéticos abundantes, no perecibles, descentralizantes, gratuitos y ecológicamente limpios, por ello la necesidad de incursionar en el estudio de equipos de captación de fuentes alternas de energía, particularmente de las provenientes del sol.

La energía solar en si es gratis, y las instalaciones de un equipo solar de tubos concéntricos es una inversión muy rentable. Además, una instalación de energía solar térmica nos hace independientes del suministro exterior y ayuda a disminuir nuestra dependencia energética de la energía convencional. Puede ser un buen método de ahorro, ya que la inversión puede amortizarse en un período de 3 a 7 años, dependiendo de la energía a la que sustituya. (31).

Los sistemas de energía solar térmica tienen un funcionamiento muy sencillo, que permite producir agua caliente sanitaria, apoyo a calefacción y climatización de piscinas pudiendo aplicarse a todo tipo de viviendas, hoteles, restaurantes, hospitales, residencias, centros deportivos, industrias etc. (32)

Su tecnología y diseño lo convierten en uno de los colectores de mayor rendimiento del mercado con unas prestaciones difíciles de mejorar.

Los nuevos paneles solares térmicos basados en el principio termosifón y tubo de vacío, es lo último en tecnología en servicio al medio ambiente.

Gracias a su revolucionario diseño, consigue un rendimiento superior a los colectores de placa plana convencionales, prácticamente sin pérdidas energéticas y permite la captación de energía en días nublados. (24)

Los colectores de vacío resultan óptimos para el aprovechamiento de la energía solar a lo largo de todo el año ya que en los meses de verano tienen un rendimiento normal, parecido al resto de colectores, mientras que en los meses de invierno su rendimiento está por encima del resto de colectores. (24)

Entre sus principales ventajas se tiene: (24)

- Permite alcanzar altas temperaturas incluso en zonas de clima poco favorable.
- Mejor captación en días nublados.
- Mayor rendimiento con igual superficie respecto a paneles planos.
- Estética muy atractiva.
- Sustitución de tubos de forma rápida y sencilla.
- Sencillez en su montaje, permitiendo reducir los gastos de mano de obra, ya que es posible montar en el colector tubo por tubo sobre el tejado sin la necesidad de grúas.

1.2 Antecedentes

Es de vital importancia proseguir con el desarrollo de la todavía naciente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala planetaria.

La energía solar es convertida a energía útil por el ser humano, ya sea para calentar algo o producir electricidad. La intensidad de energía disponible en un punto determinado de la tierra depende, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor. (17)

La energía renovable se usa principalmente para dos cosas, aunque no son las únicas, primero para calentar cosas como comida o agua, conocida como energía solar térmica, y la segunda para generar electricidad, conocida como energía solar fotovoltaica. (17)

En el calentamiento de agua para usos domésticos, se consumen enormes cantidades de energía. Las formas más comunes de calentar agua se realizan por medio de leña o carbón vegetal, petróleo, gas o carbón mineral, electricidad y radiación solar. (11)

Aunque en todos los casos el resultado final es el mismo, agua caliente, el proceso es muy diferente, como muestran los esquemas de la figura 1.1

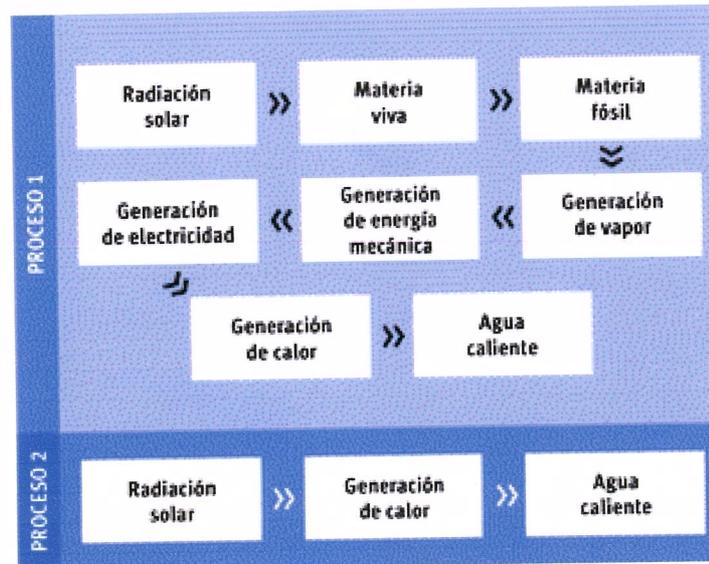


Fig. 1.1: Esquema de dos procesos diferentes de calentamiento de agua

El primero es un proceso de millones de años; el segundo es instantáneo. En el primero se utiliza una valiosa materia fósil como combustible, que pudiera ser utilizada como materia prima de diferentes productos; en el segundo no se consume ninguna materia. El primero es una de las causas de mayor contaminación; el segundo no contamina. Es evidente que no es adecuado utilizar la valiosa materia fósil como combustible, cuando existen métodos más sencillos para generar calor y calentar agua. (11)

En estos tiempos y por diferentes causas, avanza aceleradamente el uso de calentadores solares de agua, tanto para pequeños como para grandes consumidores. Ya en algunos países es obligatorio su uso para determinados fines, principalmente en las nuevas construcciones. (11)

Con el avance tecnológico se han ido desarrollando tipos de calentadores solares más eficientes y apropiados para diferentes usos, donde se necesite un rango de temperatura de trabajo mayor que la que se requiere para calentar agua para el aseo personal, tales como calentamiento industrial de fluidos, sistemas de refrigeración, etc. El que ha alcanzado mayor éxito es el calentador solar de tubos al vacío. (11)

Hay varios modelos de colectores de tubos al vacío, en dependencia del movimiento del fluido y el método de transferencia de calor utilizado. Los principales son: (11)

- Tubos al vacío a termosifón
- Tubos en U.
- Tubos calóricos o tubos concéntricos.

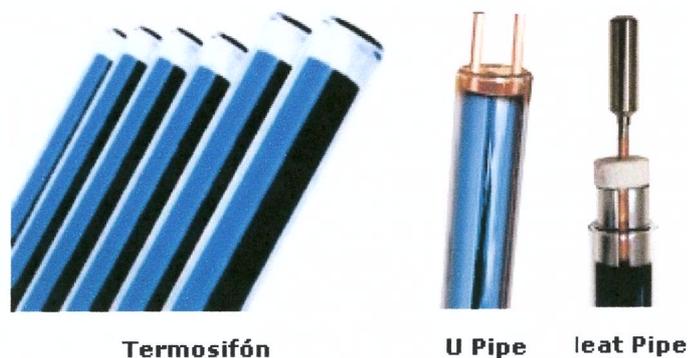


Fig. 1.2: Tubos al vacío

En la siguiente investigación se estudiará sobre los tubos al vacío a termosifón.

Los calentadores de tubos al vacío tienen el mismo principio de trabajo que los colectores de placa plana, o sea, la radiación es recibida por el absorbedor y llevada en forma de calor hacia un tanque acumulador. La diferencia consiste en que el absorbedor está formado por tubos en los cuales se ha hecho vacío para disminuir las pérdidas de calor. Están formados por tubos sencillos de vidrio donde el absorbedor suele ser un tubo interior con tratamiento óptico selectivo, lo que mejora todavía su eficiencia. Entre el tubo interior y el exterior, ambos concéntricos, existe vacío, los tubos van directamente acoplados al tanque-termo, por donde fluye el agua o líquido a calentar. (11)

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Efectuar la modelación matemática de un sistema de calentamiento de agua con energía solar con tubos concéntricos.

1.3.2 Objetivos específico

- Estudiar el marco teórico para el aprovechamiento de la energía solar.

- Analizar el funcionamiento del colector de tubos concéntricos
- Analizar los materiales adecuados para el sistema de calentamiento.
- Efectuar la modelación matemática para determinar la eficiencia del equipo de calentamiento.
- Estandarizar sistemas de calentamiento de agua con colectores de tubos concéntricos.
- Experimentar el comportamiento de un panel de tubos concéntricos para un equipo de laboratorio.
- Determinar los costos del sistema.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES SOBRE LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar es producida por el sol, es una de las llamadas energías renovables, del grupo no contaminante, conocido como energía limpia o energía verde. (18)

Sería poco racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia, inagotable, no focalizada que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.(17)

Actualmente es una de las energías renovables más desarrolladas y usadas en todo el mundo. Dentro de las energías renovables que más se están usando, la solar es la más importante hasta el momento, con inversiones en tecnología e instalaciones millonarias. (33)

Es preciso, no obstante, señalar que existen algunos problemas que se deben afrontar y superar. Aparte de las dificultades que una política energética solar avanzada conllevaría por sí misma, hay que tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas. Así, por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno, precisamente cuando más se suele necesitar. (17)

2.2 EL SOL

El sol es el elemento más importante en nuestro sistema solar. Es el objeto más grande y contiene aproximadamente el 98% de la masa total del sistema solar. Se requerirían ciento nueve tierras para completar el disco solar, y su interior podría contener más de 1.3 millones de tierras. La capa exterior visible del sol se llama la fotosfera y tiene una temperatura de 6,000°C (11,000°F). Esta capa tiene una apariencia manchada debido a las turbulentas erupciones de energía en la superficie. (16)

El sol es una estrella que se encuentra en el centro del sistema solar. La tierra y otras materias (incluyendo a otros planetas, asteroides, meteoritos, cometas y polvo) orbitan alrededor de ella, constituyendo a la mayor fuente de energía electromagnética de esta constelación. La distancia media del sol a la

tierra es de aproximadamente 149.600.000 de kilómetros, y su luz recorre esta distancia en 8 minutos y 19 segundos. (15)

Su presencia o su ausencia en el cielo determinan, respectivamente, el día y la noche. La energía radiada por el sol es aprovechada por los seres fotosintéticos, que constituyen la base de la cadena trófica, siendo así la principal fuente de energía de la vida. También aporta la energía que mantiene en funcionamiento los procesos climáticos. (15)

El sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia. Cada año el sol arroja 4000 veces más energía que la que consumimos, por lo que su potencial es prácticamente ilimitado. (17)

2.3 FORMAS DE ENERGÍA RADIANTE

La energía solar que incide sobre una superficie de la tierra se considera que consta de partes directa y difusa. (5)

La parte de la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se llama radiación solar directa G_D .

Se supone que la radiación dispersada llega a la superficie terrestre de manera uniforme desde todas direcciones y se llama radiación solar difusa G_d .

Entonces, la energía solar total que incide sobre la unidad de área de una superficie horizontal sobre el piso es: (5)

$$G_{SOLAR} = G_D * \cos \theta + G_d \quad (W / m^2) \quad (2.1)$$

En donde θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar directa (el ángulo que forma el rayo de sol con la perpendicular a la superficie). La radiación difusa varía desde alrededor de 10% de la radiación total, en un día claro, hasta cerca de 100% en un día totalmente nublado.

2.4 MÉTODOS PARA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR

Metodo de Glover y Mc Culloch:

La cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la tierra, se determina por la expresión matemática (7)

$$I = G_0 \left[0.29 * \cos \theta + 0.52 * \frac{n}{N} \right] \quad (2.2)$$



Donde:

I = Radiación solar incidente en la superficie terrestre (W/m^2)

G_0 = Constante solar o radiación que llega a la atmósfera ($1353 W/m^2$)

$\cos \phi$ = Coseno del ángulo de latitud geográfica, para Riobamba, $1^\circ 38$ min. Latitud sur, (medición mediante G.P.S.)

0.29 y 0.52 = Coeficientes experimentales que corrigen la radiación solar incidente, en función de la dispersión de la radiación solar al atravesar la atmósfera

n = Número de horas de sol brillante al día (heliofanía)

N = Número máximo de horas de sol al día en la localidad (11.8 horas), dato proporcionado por la estación agro meteorológica ESPOCH.

Método de día claro de Page (8)

Este método sugiere la siguiente ecuación para el cálculo de la radiación solar global incidente sobre una superficie horizontal.

$$G = G_o \left(A + \frac{b\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

G = Radiación solar global incidente

G_o = Constante solar

\bar{n} = Promedio de heliofanía

\bar{N} = Numero máximo de horas sol

A, b = Constantes de corrección de la radiación

Para el caso de Ecuador se recomienda: (44)

$A = 0,25$

$b = 0,45$

\bar{N} = Número máximo de horas de sol al día en la localidad (11.8 horas), dato proporcionado por la estación agro meteorológica ESPOCH.

Método de día claro de Hottel: (45)

Utiliza para la estimación de la irradiación solar directa sobre una superficie normal al haz la ecuación empírica de Hottel, válida hasta los 2.500 m de altura con una visibilidad de 23 Km. Para la estimación de la radiación difusa, se emplea el modelo de cielo anisotrópico de Page. La ecuación de Hottel incluye tres coeficientes cuyos valores dependen de la altitud del lugar y de cuatro posibles tipos de clima. En aquellas regiones en que no existe una

marcada diferencia entre inviernos y veranos (latitudes entre el Ecuador y los Trópicos) puede seleccionarse el tipo de clima "Tropical".

Método de Liu-Jordan para día medio mensual: (45)

Permite estimar las irradiaciones horarias directa y difusa sobre cualquier superficie a partir de la irradiación solar global diaria media mensual sobre superficie horizontal. Este dato es el promedio de todos los valores diarios de irradiación solar global registrados durante un mismo mes del año, promediados además a lo largo de varios años. Dado que deriva de un promedio entre días que pueden ser claros, seminublados o nublados, su valor es más conservativo que el correspondiente a los dos métodos anteriores.

2.5 ATLAS SOLAR DEL ECUADOR

La información base que se utilizó para el desarrollo del atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica, fue generada por el NREL de los Estados Unidos, cuyas acciones están orientadas a la investigación y desarrollo de energías renovables y eficiencia energética.

Este atlas representa el esfuerzo institucional y profesional que utiliza la ciencia y tecnología para poner a disposición de las instituciones públicas y privadas, la comunidad científica y público en general este valioso documento,

que incluye la cuantificación del potencial solar disponible y con posibilidades de generación eléctrica, en base a mapas mensuales de insolación directa, global y difusa y sus correspondientes isohelias, con el fin de ubicar proyectos locales más específicos que permitan utilizar esta tecnología para obtener calor y electricidad para diversas aplicaciones como fabricar colectores térmicos y módulos fotovoltaicos.

El calor recogido en los colectores se puede destinar a satisfacer numerosas necesidades de la colectividad y la industria, como calefacción, refrigeración y hornos; para fines agrícolas se puede obtener secadores, plantas de purificación o desalinización de agua. (25)

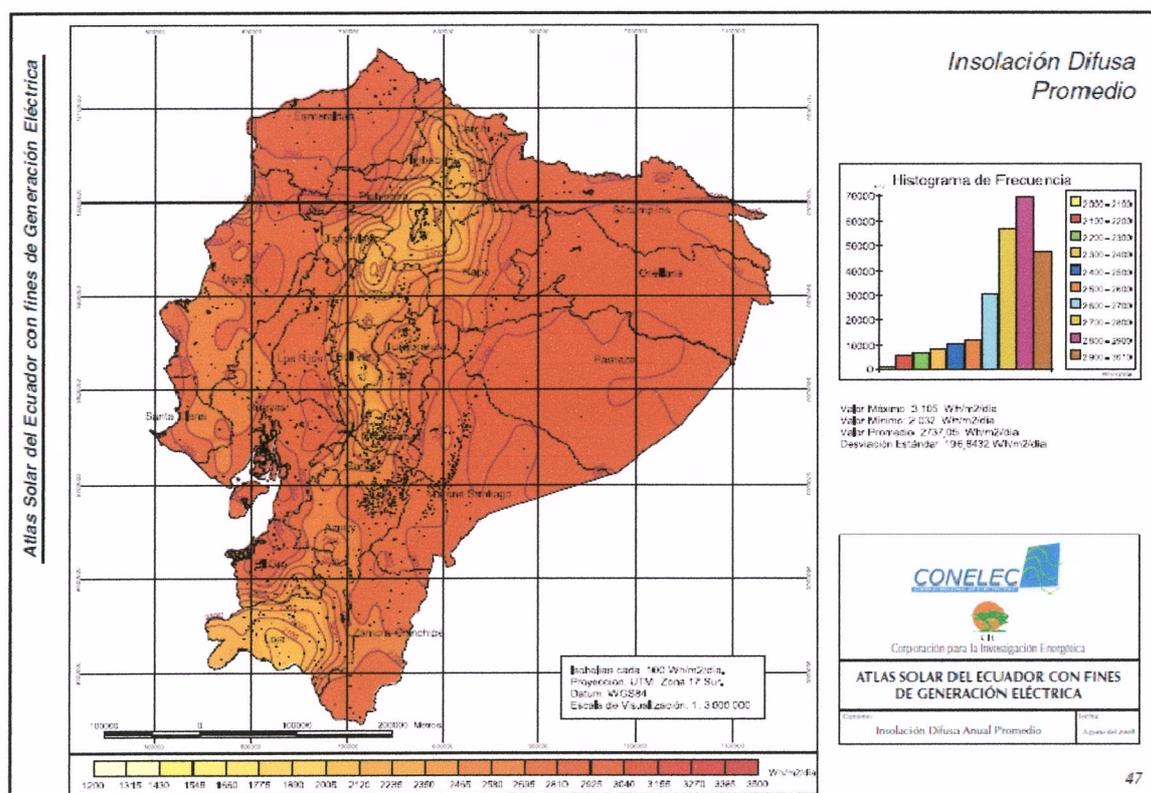


Fig. 2.1: Atlas del Ecuador. Insolación difusa promedio

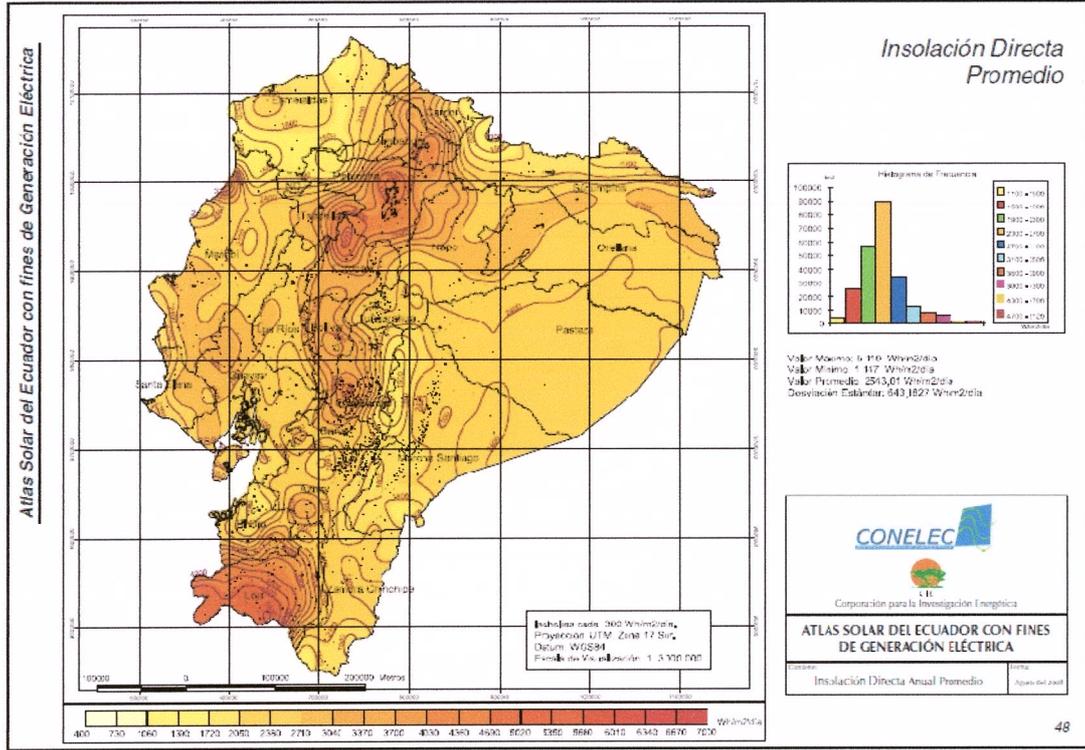


Fig. 2.2: Atlas del Ecuador. Insolación directa promedio

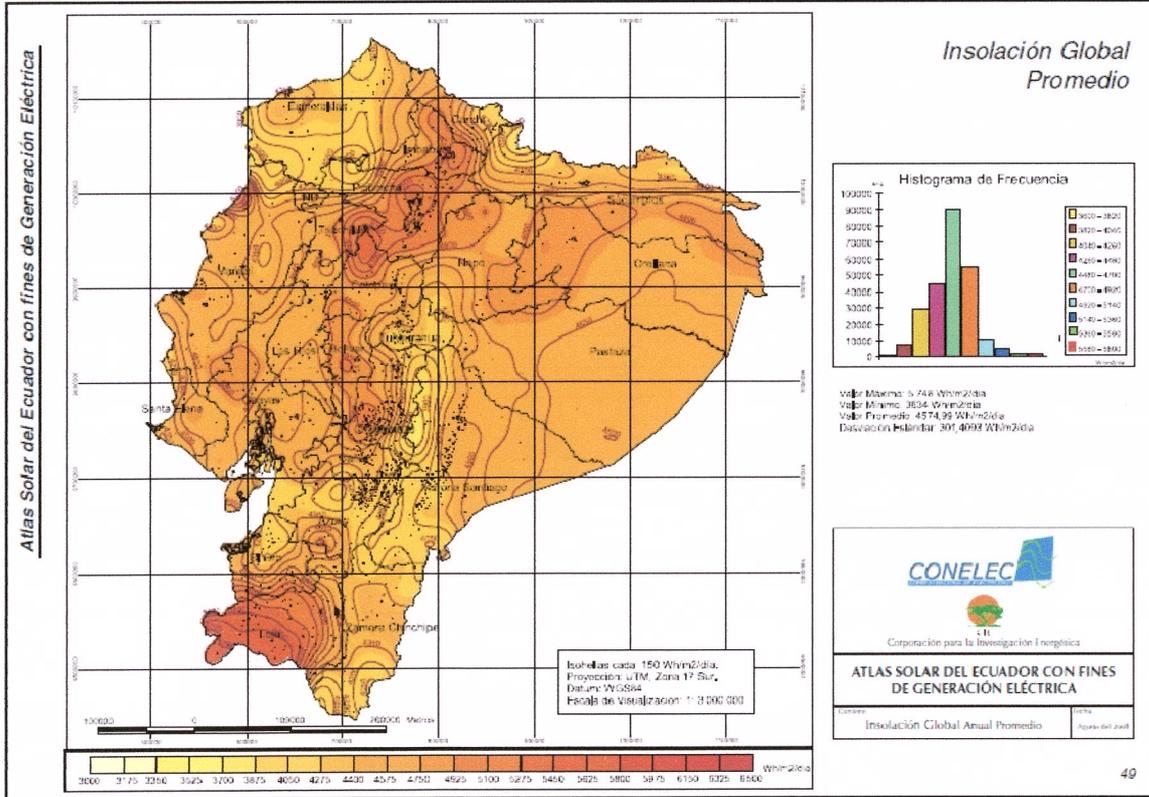


Fig. 2.3: Atlas del Ecuador. Insolación global promedio

2.6 APLICACIONES TÉRMICAS DE LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del sol para transferirla a un medio portador de calor, generalmente agua o aire. La tecnología actual permite también calentar agua con el calor solar hasta producir vapor y posteriormente obtener energía eléctrica.

Producción de agua caliente sanitaria (ACS)

La principal aplicación de la energía solar térmica es la producción de agua caliente sanitaria para el sector doméstico y de servicios. El agua caliente sanitaria se usa a una temperatura de 40 °C, temperatura a la que se puede llegar fácilmente con captadores solares que pueden alcanzar como temperatura media 80 °C. Se considera que el porcentaje de cubrimiento del ACS anual es aproximadamente del 60 %; se habla de este porcentaje, y no superior, para que en la época de mayor radiación solar no sobre energía. La energía aportada por los captadores debe ser tal que en los meses más favorables aporte el 100 %. El resto de las necesidades que no aportan los captadores se obtiene de un sistema auxiliar, que habitualmente suele ser gasóleo, gas o energía eléctrica. Con este porcentaje de cubrimiento los periodos de amortización son reducidos. (18)

Calefacción de baja temperatura

La energía solar térmica puede ser un complemento al sistema de calefacción, sobre todo para sistemas que utilicen agua de aporte a menos de 60°C.

Para calefacción con aporte solar, el sistema que mejor funciona es el de suelo radiante (circuito de tuberías por el suelo), ya que la temperatura del fluido que circula a través de este circuito es de unos 45°C, fácilmente alcanzable mediante captadores solares. (18)

Calentamiento de agua de piscinas

Otra de las aplicaciones extendidas es la del calentamiento del agua de piscinas. El uso de colectores puede permitir el apoyo energético en piscinas al exterior alargando el periodo de baño, mientras que en instalaciones para uso de invierno, en las épocas de poca radiación solar, podrán suministrar una parte pequeña de apoyo a la instalación convencional. (18)

Aire acondicionado mediante máquinas de absorción

Uno de los campos de máximo desarrollo de las instalaciones solares térmicas que se verá en un plazo breve de años será la de colectores de vacío o planos de alto rendimiento que produzcan ACS, calefacción en invierno y, mediante máquinas de absorción, produzcan frío en el verano.

La utilización de la energía solar térmica para todos estos sistemas juntos es la mejor forma de aprovechar la instalación, debido a que el uso sólo para ACS y calefacción produce algún excedente en verano, provocando sobrecalentamientos en la instalación que es necesario evitar mediante algún sistema de los existentes.

Las aplicaciones de la energía solar térmica se extienden también al sector industrial: agua caliente y precalentamiento de agua de proceso, calefacción, aire caliente y refrigeración. (18)

Secadores solares

El secado al aire libre, donde los productos se exponen directamente al sol colocándolos sobre el suelo, es uno de los usos más antiguos de la energía solar térmica y es, aún, uno de los procesos agrícolas más común en muchos

países del mundo. Este procedimiento es de muy bajo costo, pero puede sufrir grandes perjuicios por las lluvias y el ataque de insectos y otros animales.

Para evitar esos problemas y lograr mayor eficiencia, se han desarrollado diferentes sistemas de secado solar, que cuentan principalmente con dos elementos:

- El colector, donde la radiación calienta el aire.
- La cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire caliente que pasa.

Los elementos pueden ser diseñados de diferentes formas para integrarse a los equipos de secado. Existen distintos tipos de diseños, como secadores solares indirectos (utilizan el calor del sol para secar), secadores solares directos (utilizan la radiación solar directa) y mixtos.

La combinación del colector y la cámara en una sola unidad puede ser más económica en muchos casos, especialmente en secadores de menor tamaño. Su funcionamiento consiste en que el aire circula dentro del secador con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. (19)

Deshidratación de alimentos

La conservación de los alimentos mediante la deshidratación se basa en la disminución de la cantidad de agua que limita las reacciones químicas de

degradación posibles, así como el desarrollo de los microorganismos responsables de su deterioro. Un procedimiento sencillo de remoción de agua es hacer circular alrededor de los alimentos aire caliente y seco; por ejemplo, aire a 50°C y 30% de humedad relativa. (19)

2.7 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR DE TUBOS AL VACÍO TERMO-SIFÓN



Fig. 2.4: Colector de tubos al vacío termosifón

Un panel solar de tubos de vacío es un tipo de colector solar formado por tubos de vidrio al vacío, donde se produce la captación de la radiación solar.

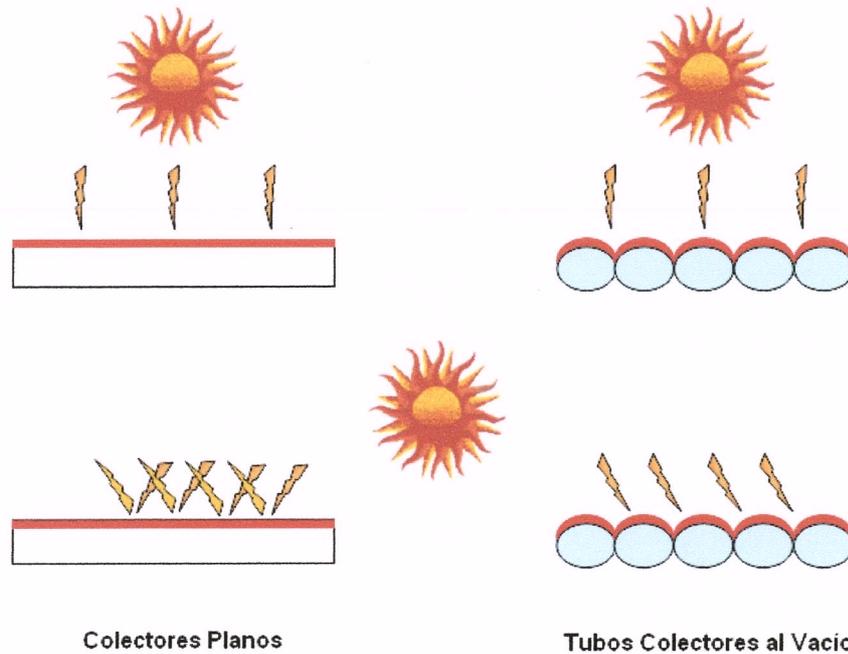


Fig. 2.5: Diferencia de los colectores placa plana con los de tubos al vacío

Los paneles de tubos suelen incorporar una placa inferior reflectante por debajo del plano de los tubos, de manera que puedan aprovechar su forma cilíndrica para absorber la energía reflejada en la placa. En general, los tubos son más eficientes en días fríos, ventosos o nublados, donde la concentración y el aislamiento de la superficie captadora presenta ventajas sobre los paneles planos.

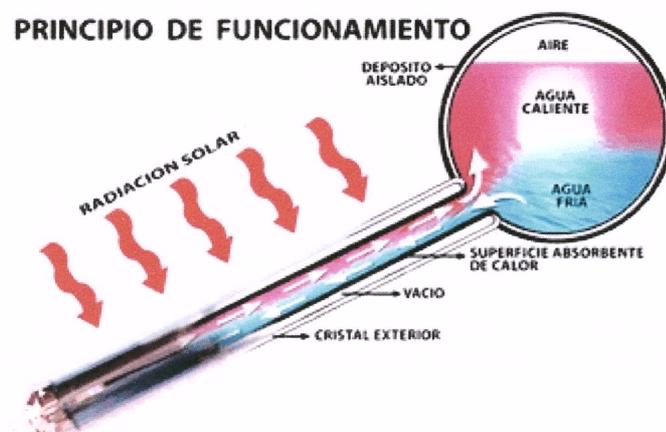


Fig. 2.6: Funcionamiento del colector con tubos al vacío termosifón



La circulación del agua se produce de forma natural sin necesidad de incorporar una bomba de recirculación, debido a la diferencia de densidad entre distintos puntos del fluido al encontrarse a distinta temperatura.

Las pérdidas se minimizan gracias al vacío que existe en el interior de los tubos, a la eficiencia de la capa absorbedora, y a espuma de poliuretano de alta densidad que aísla el depósito.

¿Qué es un tubo de borosilicato?

El tubo de borosilicato es la parte del equipo que transforma la energía solar en calor útil, y es a través de él que al agua se calienta. El tubo al vacío consiste básicamente en dos tubos concéntricos de vidrio de borosilicato. El tubo exterior de alta resistencia al impacto, capaz de resistir el impacto de un granizo de hasta 2.5 cm de diámetro. El tubo interior recubierto con nitrato de aluminio que tiene una excelente absorción de energía solar y mínimas propiedades de reflexión. (36)

Durante la fabricación del tubo, el aire existente entre los dos tubos es extraído o evacuado del espacio entre tubos para formar al vacío, el cual elimina las pérdidas de calor por conducción y convección. Para mantener el vacío dentro del tubo, un elemento de barium es expuesto a alta temperatura, el cual causa que el fondo del tubo se cubra con una capa de barium puro (plateado).

Esta capa de barium puro, es un indicar visual del vacío interno del tubo. Si el color plateado se torna blanco el vacío se ha perdido y el tubo tiene que ser reemplazado. (36)

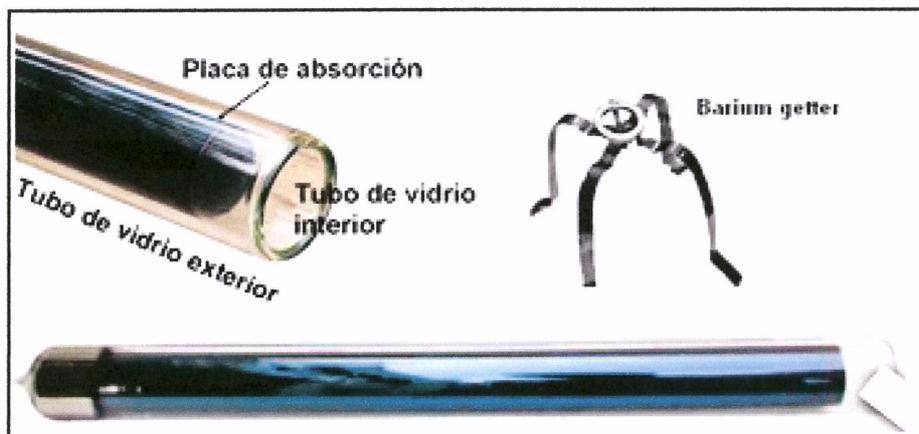


Fig. 2.7: Partes del tubo evacuado

El borosilicato, o silicato de boro, es un material componente de vidrios que se emplean extensamente en instrumentos ópticos por sus buenas propiedades ópticas, pero también mecánicas (baja dilatación).

El vidrio de borosilicato se fabrica mediante la sustitución de grandes cantidades de álcali y, con frecuencia, de toda la cal, con B_2O_3 , que reacciona con el SiO_2 . La materia prima es el bórax, tetraborato de sodio, que al calentarlo da trióxido de boro. El uso de B_2O_3 reduce el coeficiente de dilatación, por lo que la resistencia de estos vidrios a los choques térmicos.

Propiedades del vidrio de borosilicato

- Color: Claro.
- Usos principales: General.
- Composición aproximada

TABLA 2.1 COMPOSICIÓN APROXIMADA DEL BOROSILICATO (37)

| Componente | Cantidad |
|--------------------------------|-----------------|
| SiO ₂ , | 80% |
| Na ₂ O | 4% |
| B ₂ O ₃ | 12% |
| Al ₂ O ₃ | 3% |
| CaO | 0,40% |
| K ₂ | 0,60% |

CAPÍTULO III

3. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA ENERGÉTICO

3.1. Recurso solar disponible en Riobamba

Es importante conocer la intensidad de radiación solar que se tiene en la ciudad de Riobamba o en cualquier otra localidad del mundo para ello se requiere conocer con buena exactitud la cantidad de horas de sol brillante, y la cantidad de radiación solar que se dispone en el lugar donde está instalado el equipo en $\frac{w}{m^2}$.

Para la cantidad de horas de sol brillante es necesario efectuar una investigación de campo relacionada con la toma, ordenamiento y procesamiento de esta variable por el lapso de al menos diez (10) años atrás, que proporcionaría confiabilidad en la determinación de la radiación solar de la localidad. La información que se tiene a continuación es recopilada de la estación meteorológica de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH.

Tabla 3.1

TABLA 3.1: HELIOFANÍA PROMEDIO DE RIOBAMBA (Horas sol/día)

| AÑO MES | ENE. | FEB. | MAR. | ABR. | MAY. | JUN. | JUL. | AGO. | SEP. | OCT. | NOV. | DIC. | PROM. |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1997 | 5,9 | 4,8 | 5,2 | 5,7 | 5,9 | 6,3 | 6,3 | 5,2 | 4,4 | 5,5 | 4,2 | 5,4 | 5,40 |
| 1998 | 4,9 | 2,7 | 4,5 | 4,9 | 5,1 | 5 | 4,9 | 5 | 5 | 5,7 | 6,7 | 7,9 | 5,19 |
| 1999 | 5,2 | 2,9 | 4,3 | 4,8 | 4,4 | 4,6 | 5,7 | 5 | 3,4 | 5 | 6,7 | 4,7 | 4,73 |
| 2000 | 4,9 | 4,2 | 3,8 | 4,7 | 4,5 | 5,2 | 6 | 4,7 | 3,8 | 6,6 | 7,6 | 6,5 | 5,21 |
| 2001 | 5,4 | 5,5 | 4,2 | 4,7 | 5,2 | 6,8 | 3,1 | 2,7 | 4,3 | 7,1 | 5,5 | 6,1 | 5,05 |
| 2002 | 6,3 | 4,8 | 3,6 | 4,6 | 3,8 | 3,4 | 4,2 | 4,8 | 4,7 | 3,8 | 2,6 | 2,9 | 4,13 |
| 2003 | 3,8 | 3,3 | 2,3 | 3,1 | 1,8 | 1,5 | 5 | 2,6 | 1,7 | 5,3 | 5,3 | 4,7 | 3,37 |
| 2004 | 8,1 | 4,8 | 3,4 | 4,2 | 4,9 | 5,5 | 5,5 | 6,3 | 4,5 | 5,2 | 5,3 | 6,1 | 5,32 |
| 2005 | 6,7 | 4,4 | 3,2 | 5,9 | 4,9 | 5,4 | 7,2 | 5,2 | 5,5 | 3,8 | 7,6 | 3,1 | 5,24 |
| 2006 | 4,8 | 6,7 | 4,3 | 3,9 | 6,7 | 5,5 | 5,3 | 4,2 | 4,1 | 5,7 | 5,2 | 4,2 | 5,05 |
| 2007 | 3,2 | 6,2 | 3,8 | 3,8 | 5,3 | 3,7 | 7 | 5,2 | 3,1 | 4,4 | 5 | 4,5 | 4,60 |
| 2008 | 5,2 | 3,8 | 4,2 | 4,5 | 4,5 | 5,8 | 5,94 | 5,5 | 5 | 5,4 | 5,1 | 5,3 | 5,0 |
| 2009 | 3,9 | 3,4 | 5,4 | 4,8 | 6,2 | 5,1 | 5,9 | 3,9 | 6,7 | 5,7 | 6,6 | 6,4 | 5,30 |
| PROM. | 5,3 | 4,4 | 4,0 | 4,6 | 4,9 | 4,9 | 5,5 | 4,6 | 4,3 | 5,3 | 5,6 | 5,2 | 4,90 |

Fuente: Estación agro meteorológica de la ESPOCH. Tabla completada (9), con los 2 últimos años.

Para la realización de las pruebas en el colector solar es necesario tener el valor de la radiación solar disponible en la ciudad en donde está ubicado el equipo, para esto se utilizo la estación meteorológica de la Facultad de Mecánica (ESPOCH). Tabla 3.2.

La estación meteorológica de la Facultad de Mecánica es de marca DAVIS. Su serie es Vantage Pro 2 Plus, la misma que tiene funciones primarias y secundarias.



FIG. 3.1: Sensores de la estación meteorológica

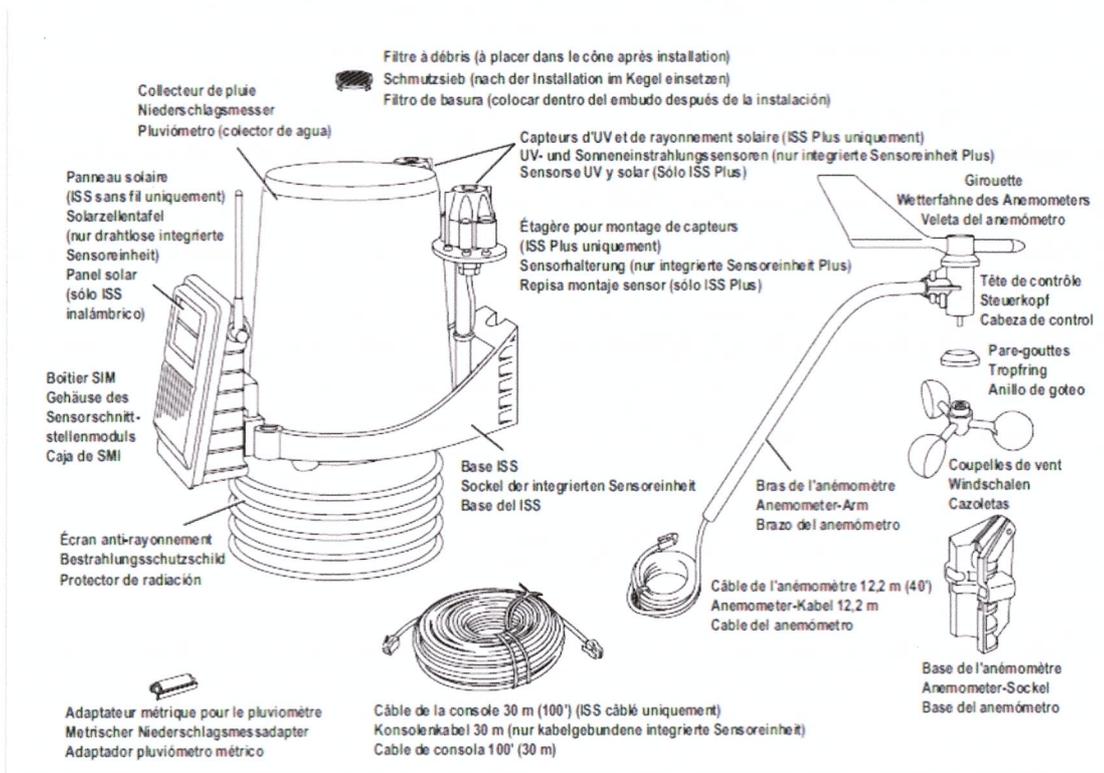


Fig. 3.2: Partes de la estación meteorológica.

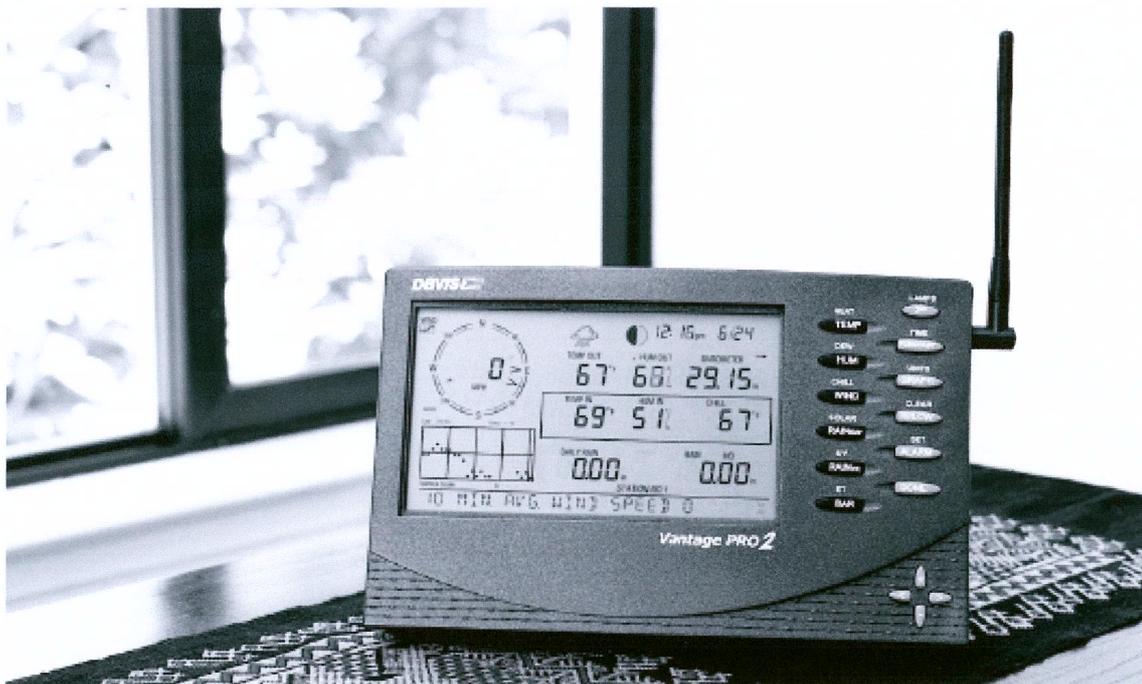


Fig. 3.3: Consola

Pulse y suelte 2ND y a continuación pulse SOLAR para visualizar la lectura de la radiación solar actual. La radiación solar se visualiza en Watts por metro cuadrado (W/m^2). La sensibilidad que tiene el equipo es de $\pm 2\%$ (38)

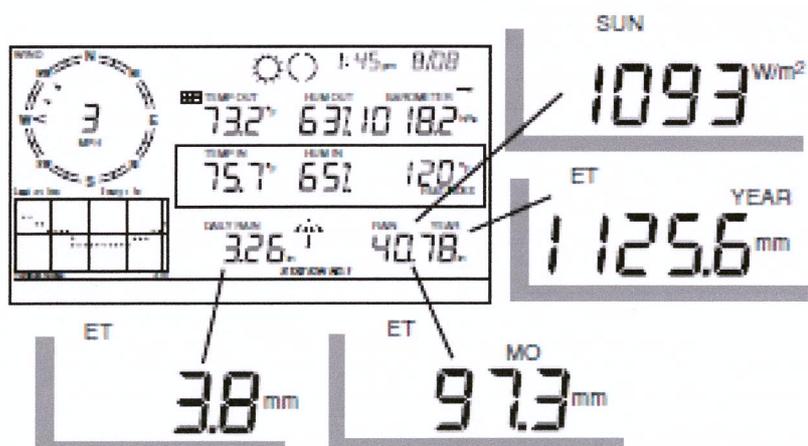


Fig. 3.4: CONSOLA. RADIACIÓN SOLAR

TABLA 3.2: RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA (W/m^2)

| | Soleado | Nublado | Claro | Claro | Soleado | Nublado | Claro | |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| HORAS DÍAS | 06/05/10 | 07/05/10 | 08/05/10 | 09/05/10 | 10/05/10 | 11/05/10 | 12/05/10 | PROM |
| 7:00:00 | 20 | 22 | 21 | 15 | 21 | 15 | 13 | 18,1 |
| 8:00:00 | 100 | 104 | 105 | 98 | 150 | 90 | 141 | 112,6 |
| 9:00:00 | 346 | 307 | 297 | 288 | 320 | 194 | 311 | 294,7 |
| 10:00:00 | 671 | 731 | 482 | 446 | 761 | 309 | 618 | 574,0 |
| 11:00:00 | 672 | 509 | 596 | 517 | 971 | 418 | 637 | 617,1 |
| 12:00:00 | 607 | 535 | 694 | 596 | 860 | 586 | 577 | 636,4 |
| 13:00:00 | 527 | 427 | 730 | 711 | 577 | 544 | 682 | 599,7 |
| 14:00:00 | 796 | 398 | 718 | 683 | 572 | 479 | 473 | 588,4 |
| 15:00:00 | 712 | 229 | 499 | 676 | 539 | 438 | 510 | 514,7 |
| 16:00:00 | 668 | 443 | 482 | 646 | 532 | 432 | 593 | 542,3 |
| 17:00:00 | 412 | 225 | 399 | 388 | 215 | 172 | 367 | 311,1 |
| 18:00:00 | 139 | 41 | 109 | 119 | 98 | 91 | 97 | 99,1 |
| 19:00:00 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 0 | 2 | 1,9 |
| PROM. | 709,00 | 496,50 | 641,75 | 648,25 | 702,38 | 471,00 | 627,63 | 613,8 |

Fuente: Estación meteorológica de la Facultad de Mecánica (ESPOCH).
 Datos recopilados durante una semana, en la ciudad de Riobamba.

Es importante aclarar que durante el día existen picos máximos de radiación que son momentáneos, como se muestran en la tabla. 3.3

TABLA 3.3: PICOS DE RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA (W/m^2)

| Días | Radiación (W/m^2) |
|------------|-----------------------|
| 06/05/2010 | 1124 |
| 07/05/2010 | 1088 |
| 08/05/2010 | 1223 |
| 09/05/2010 | 1187 |
| 10/05/2010 | 1285 |
| 11/05/2010 | 981 |
| 12/05/2010 | 1241 |

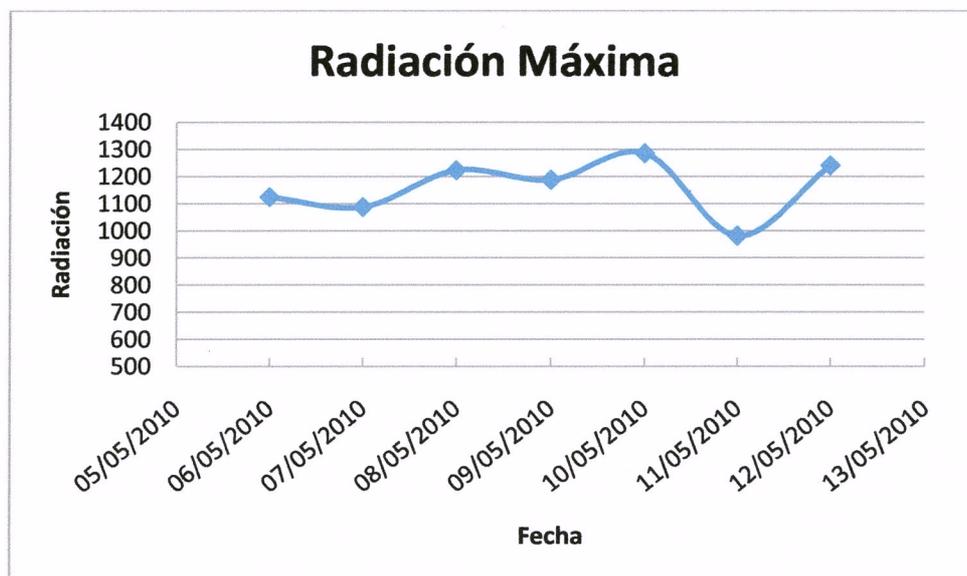


Fig. 3.5: Radiación máxima momentánea

3.1.1 Variables físicas: temperatura, viento

Las variables físicas que se utilizan para comprender el funcionamiento de los colectores solares son básicamente:

- Temperatura ambiental ($^{\circ}\text{C}$)
- Velocidad del viento (m/s)

Temperatura ambiente: es la temperatura que se puede medir con un termómetro y que se toma del ambiente actual.

Velocidad del viento: la velocidad y dirección de los vientos se mide con el anemómetro, que suele registrar dicha dirección y velocidad a lo largo del tiempo.

Los datos que se muestran a continuación son valores promedios del ambiente y de la velocidad del viento de la localidad donde se encuentra instalado el colector solar utilizado para el calentamiento de agua con energía renovable. Los datos se muestran en la tabla 3.4 y tabla 3.5

TABLA 3.4: TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO DE RIOBAMBA (°C)

| AÑO/MES | ENE. | FEB. | MAR. | ABR. | MAY. | JUN. | JUL. | AGO. | SEP. | OCT. | NOV. | DIC. | PROM. |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1997 | 13,7 | 13 | 13,9 | 13,3 | 13,3 | 13,1 | 11,8 | 11,8 | 13 | 14,1 | 13,5 | 14 | 13,2 |
| 1998 | 14 | 14 | 14,5 | 14,4 | 13,5 | 12,5 | 11,9 | 12,1 | 12,8 | 13,4 | 14,4 | 14,3 | 13,5 |
| 1999 | 13,8 | 13 | 13 | 12,7 | 12,4 | 12,4 | 11,7 | 12 | 12,3 | 12,8 | 13,9 | 13,7 | 12,8 |
| 2000 | 13,3 | 12 | 12,7 | 12,6 | 12,5 | 12,4 | 11,8 | 11,3 | 12,4 | 13,2 | 13,9 | 13,3 | 12,6 |
| 2001 | 12,9 | 13 | 13,1 | 13,6 | 13,7 | 12,6 | 12,8 | 13,9 | 13 | 14,9 | 14,2 | 14,5 | 13,5 |
| 2002 | 14,4 | 14 | 13,9 | 14,2 | 13,9 | 12,3 | 12,9 | 12,4 | 13,1 | 13,1 | 12,9 | 13,7 | 13,4 |
| 2003 | 14,1 | 14 | 13,4 | 12,8 | 13,3 | 11,8 | 12,1 | 12,9 | 14,4 | 14,6 | 14,2 | 13,8 | 13,5 |
| 2004 | 15,5 | 14 | 14,4 | 13,8 | 13,8 | 12,8 | 12,5 | 12,6 | 13,4 | 14,2 | 14,3 | 14,4 | 13,8 |
| 2005 | 17,1 | 15 | 13,5 | 14,3 | 14,9 | 13,8 | 13,3 | 13,4 | 14 | 13,8 | 14,5 | 13,7 | 14,3 |
| 2006 | 14 | 14 | 13,6 | 13,7 | 13,8 | 12,5 | 12,6 | 12,9 | 13,2 | 14,4 | 13,6 | 14,1 | 13,5 |
| 2007 | 14,6 | 15 | 13,8 | 13,4 | 13,8 | 12 | 12,9 | 12,3 | 12,1 | 13,4 | 13,6 | 14,3 | 13,4 |
| 2008 | 14 | 13,2 | 13,2 | 13,4 | 13,1 | 12,8 | 12,3 | 12,7 | 13 | 14,2 | 14,8 | 14,2 | 13,4 |
| 2009 | 14 | 13,7 | 15,2 | 14,9 | 13,3 | 13 | 13,1 | 13,7 | 13,6 | 12,4 | 14,6 | 15 | 13,9 |
| PROM. | 14,3 | 13,7 | 13,7 | 13,6 | 13,5 | 12,6 | 12,4 | 12,6 | 13,1 | 13,7 | 14,0 | 14,1 | 13,4 |

Fuente: Estación agro meteorológica de la ESPOCH. Tabla completada (9), con los 2 últimos años.

TABLA 3.5: VELOCIDAD DE VIENTO PROMEDIO DE RIOBAMBA (m/s)

| AÑO/MES | ENE. | FEB. | MAR. | ABR. | MAY. | JUN. | JUL. | AGO. | SEP. | OCT. | NOV. | DIC. | PROM. |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1997 | 1,6 | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2 | 2,2 | 2,6 | 2,2 | 1,9 | 1,5 | 2 | 2,0 |
| 1998 | 2 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 2,1 | 2,2 | 1,9 | 1,9 | 2,2 | 1,8 |
| 1999 | 2,2 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 2,5 | 2,5 | 1,9 | 2,1 | 2,1 | 1,8 | 2,0 |
| 2000 | 2,1 | 2 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 2,2 | 2,9 | 2,3 | 2,6 | 2,5 | 2,8 | 2,5 | 2,3 |
| 2001 | 2,4 | 2,6 | 2,1 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 2,8 | 3 | 2,4 | 2,7 | 2,5 | 2,7 | 2,6 |
| 2002 | 2,4 | 2,4 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,4 | 2,9 | 2,9 | 2,8 | 2,6 | 2,2 | 2,1 | 2,4 |
| 2003 | 2,7 | 2,7 | 2 | 2,5 | 2,3 | 1,9 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,4 | 2,2 | 2,2 | 2,4 |
| 2004 | 2,5 | 2,3 | 2,7 | 2,3 | 2,4 | 2,8 | 2,9 | 2,9 | 1,9 | 2,2 | 2,9 | 2 | 2,5 |
| 2005 | 2,3 | 2,1 | 1,8 | 2 | 2,3 | 2,3 | 2,8 | 2,6 | 2,7 | 1,6 | 2,2 | 5,8 | 2,5 |
| 2006 | 2,3 | 1,9 | 2,2 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,6 | 4 | 2 | 2,2 | 2 | 1,8 | 2,2 |
| 2007 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 2,4 | 2 | 2,2 | 2 | 2 | 1,8 | 2,0 |
| 2008 | 3,1 | 1,8 | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 1,8 | 2 | 2 | 2 | 1,9 | 1,4 | 1,5 | 1,9 |
| 2009 | 1,6 | 1,4 | 1,8 | 1,7 | 1,9 | | | | | | | | |
| PROM. | 2,3 | 2,0 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,5 | 2,6 | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 2,4 | 2,2 |

Fuente: Estación agro meteorológica de la ESPOCH. Tabla completada (9), con los 2 últimos años.

3.2. Recurso energético disponible

Es la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la tierra, y se puede determinar por diferentes expresiones matemáticas, además con la ayuda del atlas solar del Ecuador, como son:

- Método de Glover y Mc Culloch
- Método de Page
- Atlas solar del Ecuador

3.2.1 Cálculo del potencial solar

Método Glover y Mc Culloch

Entonces se reemplaza los datos antes tabulados, en la ecuación (2.2), se determina la radiación promedio para la ciudad de Riobamba:

$$I = 1373 \frac{W}{m^2} \left[0.29 * \cos(1.63) + 0.52 \left(\frac{4.9}{11.8} \right) \right]$$

$$I = 688,433 \frac{W}{m^2}$$

Método de Page

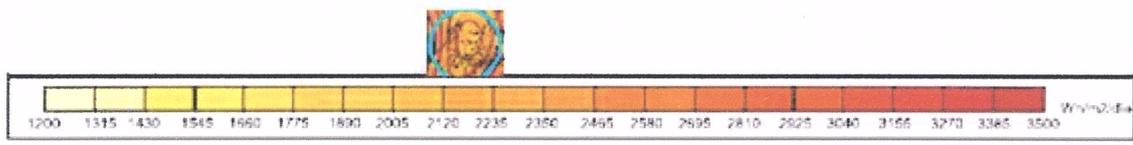
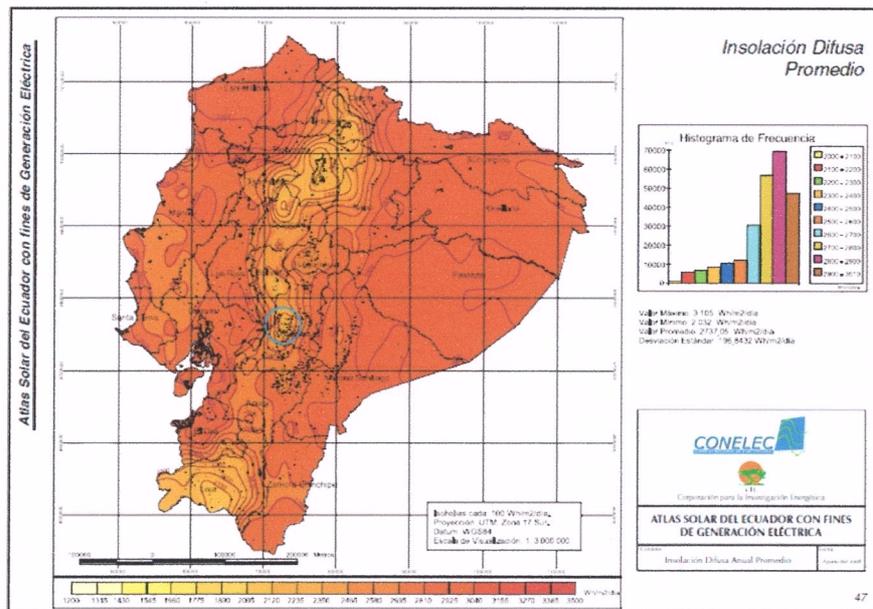
Se calcula por medio de la ecuación (2.3) para comprobar el valor antes obtenido de la radiación promedio para la ciudad de Riobamba.

$$G = 1373 \frac{w}{m^2} \left(0,25 + \frac{0,45 * 4,8}{11,8} \right)$$

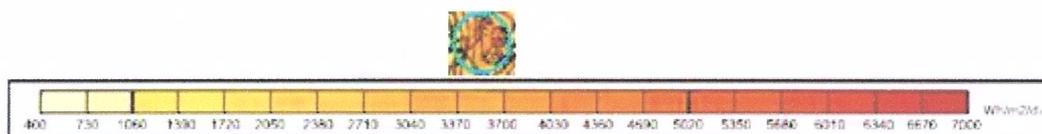
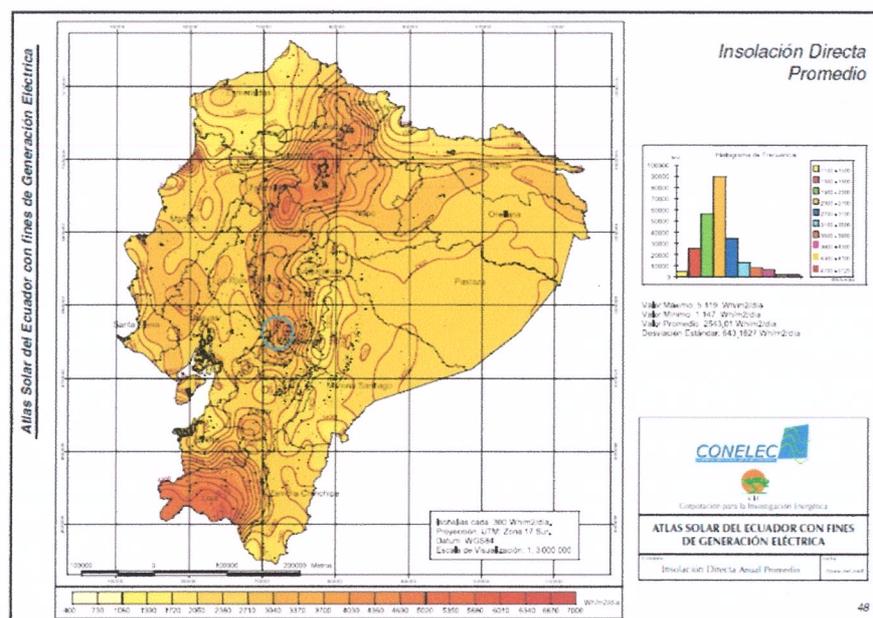
$$G = 594,579 \frac{w}{m^2}$$

Mediante el atlas solar

Las pruebas en el colector solar fueron realizadas en la ciudad de Riobamba y con ayuda de las fig. 2.1, fig. 2.2, y fig. 2.3 podemos realiza un análisis comparativo de colores en los que se obtiene los siguientes resultados:



De la Fig. 2.1 la insolación difusa promedio es $2120 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día}$



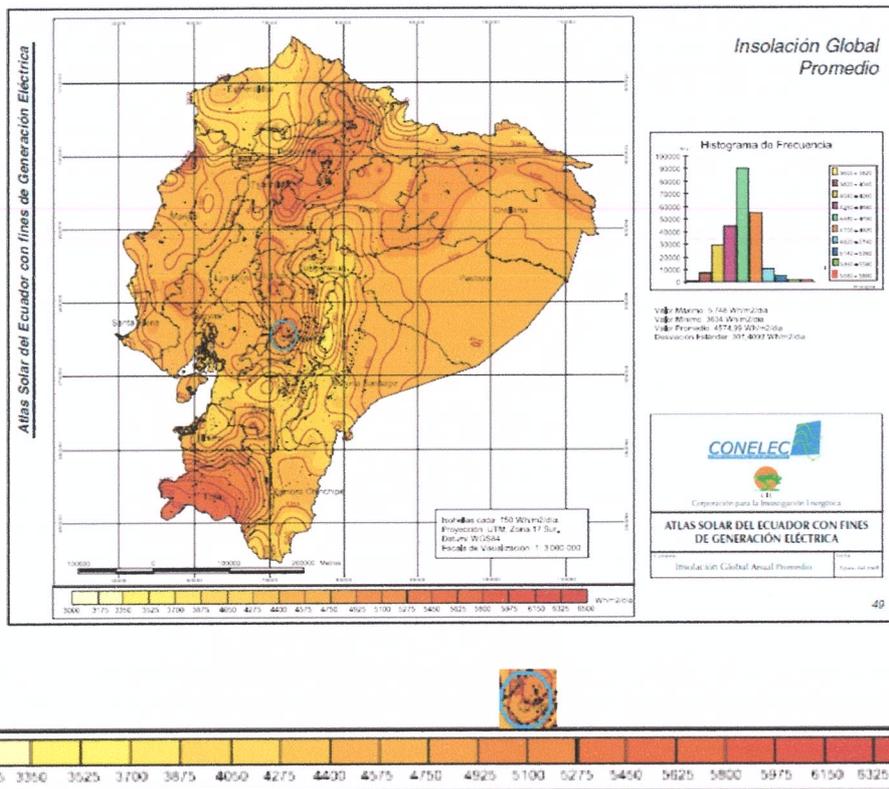
De la Fig. 2.2 la insolación directa promedio es $3370 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día}$

Reemplazando estos datos en la ecuación 2.1 tenemos:

$$G_{SOLAR} = G_D * \cos \theta + G_d \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$G_{SOLAR} = \frac{3370 * \cos 1,63 + 2120}{8}$$

$$G_{SOLAR} = 686,08 \frac{W}{m^2}$$



De la Fig. 2.3 la insolación global promedio es $5100 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día}$

Por ende la radiación solar recibida en la ciudad de Riobamba es $637,5 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ ya que se asume que se tiene 8 horas de radiación en el día.

3.3 Demanda energética

La demanda energética para calentamiento de agua de uso doméstico está basada en el consumo de combustibles, entre los que se encuentran el gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), querosén, carbón y electricidad.

Un calentador de agua, calefón, caldera o boiler son dispositivos termodinámicos que utilizan energía para elevar la temperatura del agua. Entre

los usos domésticos y comerciales del agua caliente están la limpieza, las duchas, para cocinar o la calefacción.

Alternativamente también se emplea la energía solar, bombas de calor (compresor) de refrigeradores o de acondicionadores de aire, calor reciclado de aguas residuales (no aguas negras) y hasta energía geotérmica. En el caso de las aguas calentadas con energías alternativas o recicladas, éstas usualmente se combinan con energías tradicionales.

Los tipos de calentadores de agua más conocidos son:

- Calentador de punto
- Calentador de paso (sin tanque)
- Calentador de acumulación
- Caldera (para recirculación)

El tipo de calentador y el tipo de combustible a seleccionar depende de muchos factores como la temperatura del agua que se desea alcanzar, disponibilidad local del combustible, costo de mantenimiento, costo del combustible, espacio físico utilizable, caudal instantáneo requerido, clima local, y costo del calentador. (20)

En la actualidad, la distribución de energía eléctrica se realiza a través del Sistema Nacional Interconectado, que permite llevar la energía proveniente de las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas hasta todas las regiones del país.

La capacidad total de energía instalada es de 2 763 Mw; están en funcionamiento 74 centrales eléctricas, de las cuales 33 son centrales hidráulicas, 18 son térmicas a vapor, 13 son centrales a turbo gas y 10 son a diesel oil. El Instituto Ecuatoriano de Electrificación (Inecel) dispone de otras 221 centrales particulares, basándose en contratos que permiten atender la disminución de generación por parte de las hidroeléctricas en la época de estiaje. El 60% de la energía generada es de origen hidroeléctrico y la restante de origen térmico. (23)

La demanda energética es la cantidad de energía que se requiere para un determinado fin, en el caso que se necesite calentar agua se determinará esta demanda mediante la determinación del calor requerido para calentar el fluido (8)

$$Q = m * C_p * (T_f - T_i) \quad (3.1)$$

Donde:

Q = Calor requerido para calentar el agua (W)

m = Cantidad de agua a calentar (lts, Kg.)

c_p = Calor específico del agua ($4181,1 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}$)

T_i, T_f = Temperaturas del fluido frío y caliente, respectivamente ($^\circ K$)

Al igualar el recurso disponible y la demanda requerida, se puede encontrar el área de colectores solares para el calentamiento del agua.

$$A = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)}{I \cdot n_1 \cdot \eta} \quad (3.2)$$

Donde:

A = Área de colectores solares (m^2)

η = Eficiencia del sistema de calentamiento (0.45 - 0.75)

n_1 = Número de horas que trabaja el colector solar

I = radiación incidente en el colector. Ec (4.2)

TABLA 3.6: DEMANDA DE ENERGIA ELÉCTRICA

| Demanda anual de Energía Eléctrica del País por grupo de consumo (GWh) | | | | | | | |
|---|-------------|-----------|------------|------------|----------|-----------|---------------|
| Año | Residencial | Comercial | Industrial | A. Público | Otros | Total | Variación (%) |
| 1999 | 2.960,30 | 1.263,99 | 2.072,56 | 593,21 | 840,63 | 7.730,69 | |
| 2000 | 2.796,30 | 1.361,35 | 2.196,64 | 620,24 | 910,55 | 7.885,08 | 2,00% |
| 2001 | 2.896,96 | 1.411,66 | 2.289,89 | 634,09 | 924,91 | 8.157,52 | 3,46% |
| 2002 | 3.098,30 | 1.570,27 | 2.520,26 | 663,68 | 743,06 | 8.595,57 | 5,37% |
| 2003 | 3.269,65 | 1.674,40 | 2.568,82 | 675,04 | 919,31 | 9.107,22 | 5,95% |
| 2004 | 3.515,64 | 1.817,08 | 2.764,82 | 696,54 | 896,36 | 9.690,44 | 6,40% |
| 2005 | 3.702,24 | 1.964,22 | 2.966,65 | 715,82 | 955,81 | 10.304,75 | 6,34% |
| 2006 | 3.896,09 | 2.118,77 | 3.327,70 | 741,24 | 955,47 | 11.039,26 | 7,13% |
| 2007 | 4.095,05 | 2.230,84 | 3.616,94 | 765,46 | 1.155,17 | 11.863,46 | 7,47% |
| 2008 | 4.384,75 | 2.437,44 | 3.879,83 | 806,40 | 1.072,02 | 12.580,45 | 6,04% |
| 2009 | 4.686,55 | 2.581,22 | 3.994,46 | 820,29 | 1.160,68 | 13.243,21 | 5,27% |

3.3.1 Demanda energética en la ciudad de Riobamba (9)

Datos:

t = Tiempo aproximado de uso de agua caliente al día por persona en la ciudad de Riobamba ($\approx 20 \text{ min.}$).

Costo del Kw-h ($0,08 \frac{\text{dólares}}{\text{Kw-h}}$)

C_0 = Consumo de los calentadores de punto (4000 W.)

Consumo diario por persona:

$$C_{op} = t * C * C_0 \quad (3.3)$$

$$C_{op} = \frac{20 \text{ min} * 4\text{Kw} * 0.08 \text{ dólares} * 1 \text{ h}}{\text{Kw} - \text{h} * 60 \text{ min.}}$$

$$C_{op} = 0.11 \text{ dólares/diario}$$

El consumo de agua es diario y su utilización es de 365 días del año. Por lo tanto cada persona tendría un consumo anual de \$ 40,15 dólares y el número de personas promedio en una vivienda es de cinco, entonces el consumo anual de energía por vivienda es de \$ 201.

3.3 Indicadores técnico-económicos: (21)

En la civilización moderna, la disponibilidad de energía está fuertemente ligada al nivel de bienestar, a la salud y a la duración de vida del ser humano. En realidad vivimos en una sociedad que se podía denominar como "energívora". En esta sociedad, los países más pobres muestran los consumos más bajos de energía, mientras que los países más ricos utilizan grandes cantidades de la misma. Sin embargo este escenario está cambiando de forma drástica, cambio que se acentuará en los próximos años, donde serán precisamente los países en vías de desarrollo quienes experimenten con mayor rapidez un aumento en su consumo de energía debido al incremento que tendrán tanto en sus poblaciones como en sus economías.

El consumo de energía en el mundo se incrementará en un 57% entre 2004 y 2030, a pesar de que se espera que el aumento de precios tanto del petróleo como del gas natural siga en aumento. En el informe "Internacional Energy Outlook 2005 (IEO 2007)" se prevé que el consumo de energía en el

mercado experimente un incremento medio de un 2,5% por año hasta 2030 en los países ajenos a la OCDE (Organización para la cooperación y desarrollo económico), mientras que en los países miembros será tan solo del 0,6%; así, durante este periodo, los países OCDE incrementarán su demanda energética en un 24%, mientras que el resto de países lo harán al 95%. En cifras, el uso total de energía en el mundo crecerá:

TABLA 3.8: CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA

Unidades: cuatrillones unidades térmicas inglesas (BTU)

| 2004 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|------|------|------|------|------|------|
| 447 | 511 | 559 | 607 | 654 | 702 |

Las economías emergentes serán, con mucho, las responsables del crecimiento proyectado en el consumo de energía dentro del mercado en las dos próximas décadas. La actividad económica medida por el producto interior bruto como medida del poder adquisitivo, se espera que se incremente en un 5,3% por año en los mercados de los países fuera de la OCDE, frente al 2,5% de los países miembros.



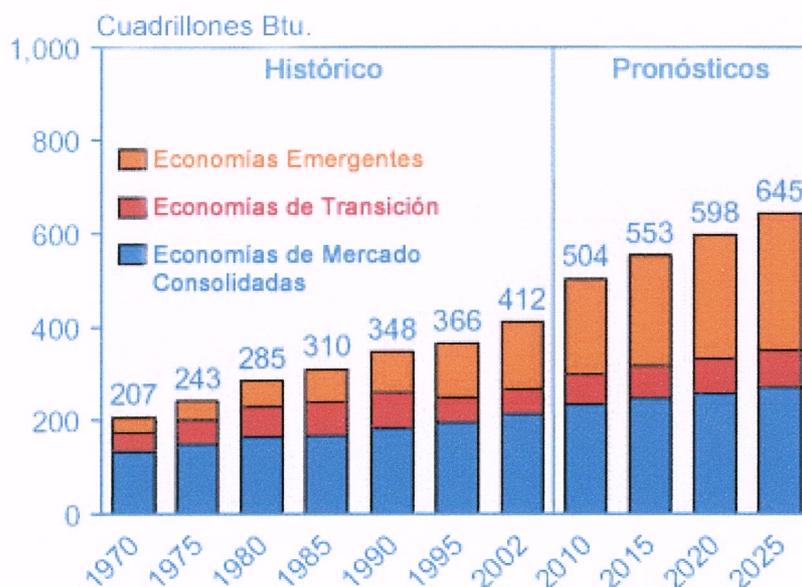


Fig. 3.6: Consumo total de energía

Las tendencias indican que el consumo de energía por sector puede estar sometido al ritmo de desarrollo económico por región. A nivel mundial, los sectores industrial y de transporte son los que experimentarán un crecimiento más rápido, del 2,1% por año, en ambos sectores. Crecimientos más lentos se producirán en el ámbito residencial y comercial, con un promedio anual de 1,5 y 1,9% entre 2002 y 2025. En los mercados consolidados, donde el crecimiento de la población se espera que sea muy pequeño o negativo, el sector comercial crece a un ritmo más rápido que en el resto de los sectores, y este incremento se basa en el desarrollo de las telecomunicaciones y equipamientos para oficinas, situación que pone en evidencia el desplazamiento de una sociedad industrial a una sociedad de servicios.

CAPÍTULO IV

4. MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ESTANDARIZACIÓN DEL EQUIPO

4.1 Parámetros del diseño del sistema

Para el análisis del diseño de un sistema de colectores solares para calentamiento de agua de uso doméstico, se analiza los siguientes parámetros para los diferentes componentes del mismo en base a las siguientes consideraciones técnicas:

- La geometría del colector es de tubos concéntricos al vacío.
- El cielo es considerado un cuerpo negro para longitud de onda larga.
- El gradiente de temperatura en las paredes de los tubos no es despreciable.
- Son despreciables los efectos del polvo y suciedad en los tubos.
- Se considera que no existen sombras sobre el panel.
- El sistema está diseñado para circulación natural (sistema termosifón).

- Los materiales serán analizados para determinar la eficiencia térmica del sistema.
- Caudales, temperaturas, características meteorológicas, valores debidamente justificados.

4.2 Modelo matemático

4.2.1 Suposiciones del modelo matemático

- Existen condiciones estacionarias de operación.
- Las propiedades del agua deben evaluarse a temperatura promedio.
- Las temperaturas de las superficies se consideran isotérmicas.
- El aire es un gas ideal.

4.3 Calor total admitido

$$Q_{adm} = S \quad (4.1)$$

Donde:

$$Q_{adm} = \text{calor admitido} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

$S = \text{irradiación solar incidente en el colector} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

Irradiación solar incidente en el colector (S):

$$S = S_{sup} + S_{inf} \quad (4.2)$$

Donde:

$S_{sup} = \text{irradiación solar incidente en el colector por la parte superior} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

$S_{inf} = \text{irradiación solar incidente en el colector por la parte inferior} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

Irradiación solar incidente en la parte superior (S_{sup}):

$$S_{sup} = \alpha_1 * \tau_2 * S \quad (4.3)$$

Donde:

$\alpha_1 = \text{absortividad de irradiación del cuerpo 1 (tubo interno del vidrio)}$

$\tau_2 = \text{transmisibilidad de irradiación del cuerpo 2 (tubo externo del vidrio)}$

$S = \text{Irradiación solar} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

Irradiación incidente en la parte inferior (S_{inf}) :

$$S_{inf} = \epsilon_3 * \sigma * T_7^4 * \alpha_1 * \tau_2 * F_{3-2} \quad (4.4)$$

Donde:

$\epsilon_3 =$ emisividad del cuerpo 3

$\sigma =$ constante de Stefan Boltzmann $\left(5,67 E^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}\right)$

$T_7 =$ temperatura de la superficie de las planchas de aluminio [$^{\circ}K$]

$\alpha_1 =$ absorptividad del cuerpo 1 (tubo interno del vidrio de borosilicato)

$\tau_2 =$ transmisibilidad del cuerpo 2 (tubo externo de vidrio de borosilicato)

$F_{3-2} =$ factor de visión del cuerpo 3 al cuerpo 2 (5) Anexo 6

$$F_{3-2} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s}\right)^2\right]^{1/2} + \frac{D}{s} * \tan^{-1} * \left(\frac{s^2 - D^2}{D^2}\right)^{1/2} \quad (4.5)$$

Donde:

D = diámetro externo del cuerpo 2 [m]

S = Separación entre centro y centro de los tubos de borosilicato [m]

NOTA: El factor de visión es un valor que no toma en cuenta la inclinación que tiene el colector, ni las fluctuaciones de la dirección de los rayos solares,

esto significa que este valor no permanece constante pero para cuestiones de cálculo se acepta como una buena aproximación el valor de este factor calculado de la ecuación 4.5.

4.3.1 Calor útil (Q_u):

$$Q_u = F_{\text{óptico}}(Q_{ad} - Q_R) \quad (4.6)$$

Donde:

$$Q_{ad} = \text{calor admitido} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$Q_R = \text{calor rechazado} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$F_{\text{óptico}} = \text{factor óptico}$$

El factor óptico, o factor de rendimiento térmico máximo del colector de tubos concentradores, también se la llama ganancia máxima del colector o factor de ganancia óptica, representa físicamente el origen de la curva de rendimiento en el eje de ordenadas y es la razón de ganancia de calor útil a la ganancia de calor ideal si toda la superficie estuviese a la temperatura del fluido a la entrada de los tubos.

Se recomienda para cálculos de 0,8 a 0,9 este factor óptico. (8) (35) (40) (41) (43).

4.3.2 Pérdidas de energía (Q_R)

El cálculo del calor total de pérdidas del sistema se hace en función de la energía disipada por la parte externa a los tubos, por conducción y radiación en los mismos.

$$Q_R = U_t * (T_f - T_i) \quad (4.7)$$

Donde:

$Q_R =$ Calor rechazado

$U_t =$ Coeficiente total de pérdidas de calor $\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$

$T_f =$ Temperatura de salida del agua ($^\circ K$)

$T_i =$ Temperatura de entrada del agua al colector solar ($^\circ K$)

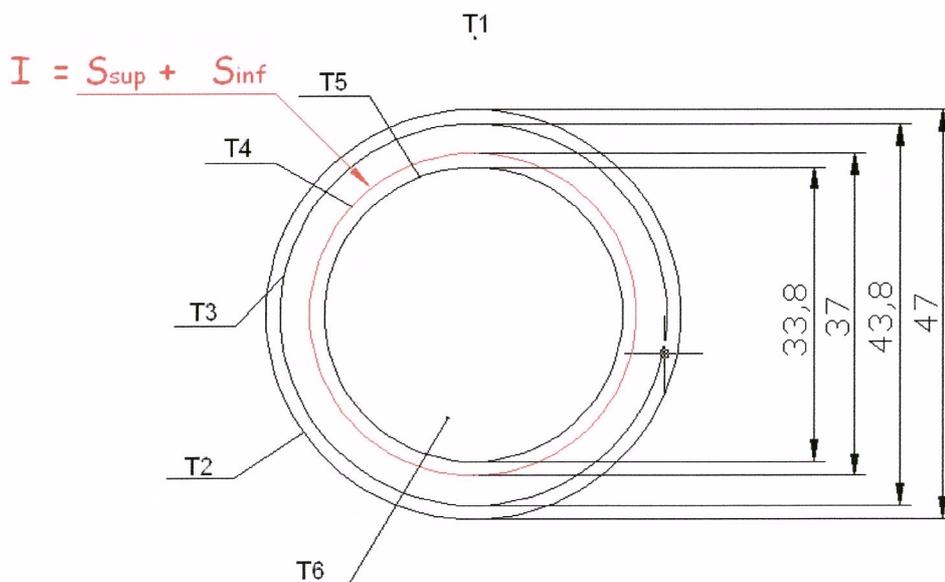


Fig. 4.1: Temperaturas

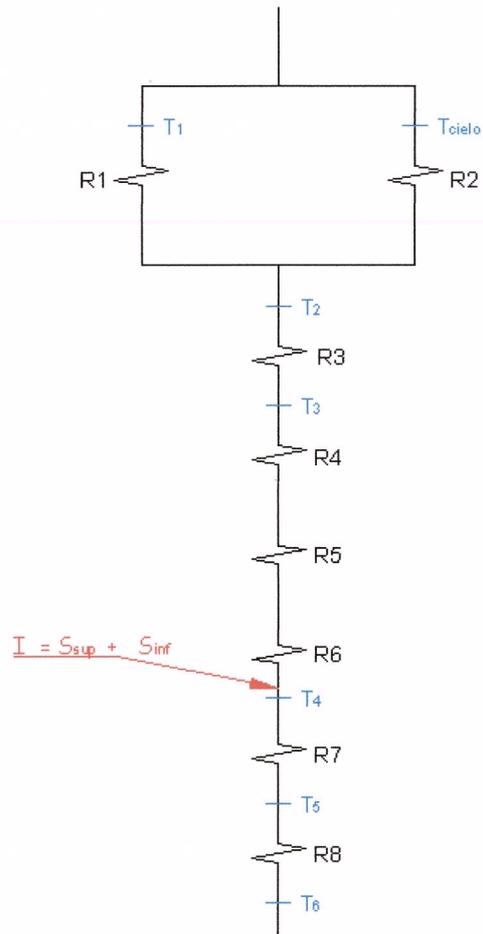


Fig. 4.2: Circuito térmico equivalente

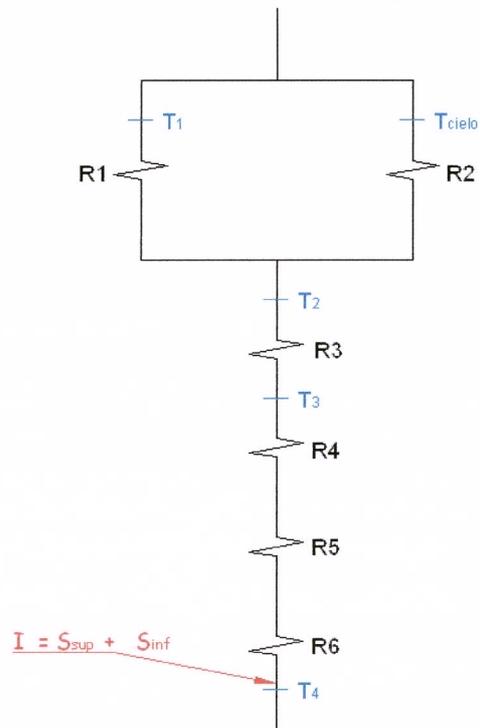


Fig. 4.3: Resistencias térmicas que producen pérdidas de calor

NOTA: Es importante aclarar que las pérdidas de calor se producen solamente por las resistencias R_1 (convección forzada), R_2 (radiación por la temperatura del cielo), R_3 (conducción en el tubo externo), R_4 , R_5 , R_6 (radiación en el vacío).

Las resistencias R_7 , R_8 , no son pérdidas ya que este es el calor útil con que el agua se calienta.

Donde:

$T_a =$ temperatura ambiente($^{\circ}K$)

$R_1 =$ resistencia por convección en el ambiente exterior

$R_2 =$ resistencia por radiación debido a la temperatura del cielo

$R_3 =$ resistencia por conducción del tubo exterior de borosilicato

$R_4 =$ resistencia por radiación del material del cuerpo 1

$R_5 =$ resistencia por radiación debido al factor de visión de 1 a 2

$R_6 =$ resistencia por radiación debido al material del cuerpo 2

$R_7 =$ resistencia por conducción del tubo interior de borosilicato

$R_8 =$ resistencia por convección natural del fluido

En consecuencia:

$$R_t = \frac{1}{U_t} = \frac{1}{U_{\text{exterior}}} + \frac{1}{U_{\text{conducción}}} + \frac{1}{U_{\text{radiación}}} \quad (4.8)$$

Donde:

$R_t = \text{Resistencia total del sistema} = \Sigma R$

$U_t = \text{Pérdidas de calor totales}$

$U_{\text{exterior}} = \text{Pérdida de calor en el exterior por el medio ambiente (convección + radiación)}$

$$U_{\text{exterior}} = \frac{1}{R_{\text{exterior}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4.9)$$

Donde:

$R_{\text{exterior}} = \text{sumatoria de las resistencias en paralelo (radiación, convección)}$

$R_1 = \text{resistencia por convección forzada} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{°K}}{\text{W}} \right]$

$$R_1 = \frac{1}{h_{\text{conv}}} \quad (4.10)$$

Donde:

$h_{\text{conv}} = \text{ambiente convectivo exterior} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°K}} \right]$

$$h_{conv} = \frac{K}{D_0} * Nu \quad (4.11)$$

Donde:

$K =$ conductividad del aire a temperatura promedio $\left(\frac{W}{m^{\circ}K}\right)$

$D_0 =$ diámetro externo del tubo de vidrio exterior (m)

$Nu =$ número de Nusselt (5)

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 * Re^{1/2} * Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} * \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (4.12)$$

Donde:

$Pr =$ número de Prandtl

$Re =$ número de Reynolds (5)

$$Re = \frac{v * D_H}{\gamma} \quad (4.13)$$

Donde:

$v =$ velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$

$\gamma =$ viscosidad cinemática del aire $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

$D_H =$ diámetro hidráulico (m) (5)

$$D_H = \frac{4A}{P_m} = \frac{4 * \frac{\pi * D^2}{4}}{\pi * D} = D \quad (4.14)$$

Donde:

$P_m =$ *perímetro mojado (m)*

$A =$ *área lateral del tubo externo del vidrio de borosilicato (m²)*

$$A = 2 * \pi * R_0 * l \quad (4.15)$$

$R_2 =$ *resistencia por radiación entre el tubo exterior y la*

temperatura del cielo $\left[\frac{m^2 * ^\circ K}{W} \right]$

$$R_2 = \frac{1}{h_{rad}} \quad (4.16)$$

Donde:

$h_{rad} =$ *conductancia por radiación entre el tubo exterior y la*

temperatura del cielo $\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$

$$h_{rad} = \varepsilon_2 * \sigma * (T_2 + T_{cielo}) * (T_2^2 + T_{cielo}^2) \quad (4.17)$$

Donde:

$\varepsilon_2 =$ *emisividad del tubo exterior de borosilicato*

$$\sigma = \text{Constante de Stefan Boltzmann} \left(5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right)$$

$$T_2 = \text{temperatura externa del tubo de borosilicato } (^{\circ}\text{K})$$

$$T_{\text{cielo}} = \text{Temperatura equivalente del cielo } [^{\circ}\text{K}] \quad (9)$$

$$T_{\text{cielo}} = 0,0552(T_a)^{1,5} \quad (4.18)$$

Donde:

$$T_a = \text{Temperatura ambiente } (^{\circ}\text{K})$$

Entonces la resistencia exterior es:

$$R_{\text{exterior}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.19)$$

$U_{\text{conducción}}$ = pérdida de calor por conducción en el tubo externo de
borosilicato

$$U_{\text{conducción}} = \frac{1}{R_{\text{conducción}}} \quad (4.20)$$

Donde:

$R_{\text{conducción}}$ = resistencia por conducción en el tubo externo de
borosilicato

$$R_{\text{conducción}} = \left(\frac{\ln(R_0/R_i)}{2 * \pi * K * l} \right) * A * N \quad (4.21)$$

Donde:

R_0 = radio externo del tubo exterior de borosilicato (m)

R_i = radio interno del tubo exterior de borosilicato (m)

K = conductividad térmica del borosilicato $\left(\frac{W}{m * ^\circ K} \right)$

l = longitud de los tubos de borosilicato que absorben la radiación solar (m)

N = número de tubos del colector

A = área lateral del tubo externo de borosilicato

$$A = 2 * \pi * R_0 * l \quad (4.22)$$

$U_{\text{radiación}}$ = pérdida de calor en el interior de los dos tubos concéntricos de

borosilicado, solo existe radiación ya que se anula la convección

por el vacío que se tiene entre los dos.

$$U_{\text{radiación}} = \frac{1}{R_{\text{radiación}}} \quad (4.23)$$

Donde:

$R_{\text{radiación}}$ = resistencia por radiación en el vacío

$$R_{\text{radiación}} = \frac{1}{h_{\text{rad}}} \quad (4.24)$$

Donde:

h_{rad} = Conductancia por radiación entre los tubos concéntricos $\left(\frac{w}{m^2 \cdot ^\circ K}\right)$

$$h_{\text{rad}} = \frac{\sigma(T_4 + T_3)(T_4^2 + T_3^2)}{\left(\frac{1}{e_1}\right) + \left(\frac{1 - e_2}{e_2}\right) \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (4.25)$$

Donde:

σ = Constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{w}{m^2 \cdot ^\circ K^4}\right)$

e_1 = Emisividad del tubo interno de borosilicato

e_2 = Emisividad del tubo externo de borosilicato

r_1 = radio externo del tubo interno (m)

r_2 = radio interno del tubo externo (m)

NOTA: Para hacer posible un análisis con respecto a la radiación se debe suponer que las superficies de un recinto son opacas, difusas o grises.

4.3.3 Eficiencia (n):

$$n = \frac{Q_U}{Q_A} * 100 \quad (4.26)$$

A continuación se muestran todos los valores, datos y resultados de la modelación matemática propuesta.

TABLA 4.1: DATOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA

| DATOS | MÉTODO | VALOR |
|--|-------------|----------|
| Irradiación incidente, I $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Ec. 2.2 | 688,43 |
| Emisividad del cuerpo 1, ϵ_1 | Anexo1 | 0,05 |
| Emisividad del cuerpo 2, ϵ_2 | Anexo1 | 0,08 |
| Emisividad del cuerpo 3, ϵ_3 | Anexo2 | 0,84 |
| Absortividad del cuerpo 1, α_1 | Anexo1 | 0,95 |
| Transmisibilidad del cuerpo 2, τ_2 | Anexo 1 | 0,9 |
| Constante Stefan - Boltzman, σ $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]$ | Tablas | 5,67E-08 |
| Diametro externo del cuerpo 2 (m) | Medición | 0,047 |
| Diametro interno del cuerpo 2 (m) | Medición | 0,0438 |
| Separación entre tubos | Medición | 0,06968 |
| Factor óptico | Tablas | 0,82 |
| Temp. de entrada del fluido, T_i ($^{\circ}K$) | Medición | 289 |
| Temp. de salida del fluido, T_s ($^{\circ}K$) | Medición | 313 |
| Cond. del aire $\left[\frac{W}{m \cdot ^{\circ}K}\right]$ | Anexo 10 | 0,02488 |
| Número de Prandtl | Anexo 10 | 0,7318 |
| Velocidad media del viento, V $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Tabla 3.5 | 2,2 |
| Viscosidad cinemática del aire, γ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ | Anexo 10 | 0 |
| Cond. del borosilicato, k $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ | Anexo 3 | 1,2 |
| Long. de los tubos expuesta al sol (m) | Medición | 1,36 |
| Área lateral del tubo exterior $[m^2]$ | Ec. (4.22) | 0,01367 |
| Número de tubos | Observación | 18 |
| Temperatura ambiente ($^{\circ}K$) | Medición | 286,4 |
| Temp. externa del cuerpo 2, T_2 ($^{\circ}K$) | Medición | 288,5 |
| Temp. Interna del cuerpo 2, T_3 ($^{\circ}K$) | Medición | 289 |
| Temp. externa del cuerpo 1, T_4 ($^{\circ}K$) | Medición | 328 |
| Temp. De las placas reflectoras, T_7 ($^{\circ}K$) | Medición | 297 |
| Caudal de agua caliente (lt) | Medición | 130 |
| Calor específico del agua, $J/(Kg \cdot ^{\circ}K)$ | Anexo 5 | 4181,08 |
| Tiempo de radiación solar en el día, t (s) | Medición | 28800 |
| Densidad del agua, ρ (Kg/m^3) | Anexo 5 | 997 |

TABLA 4.2: RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO

| ITEM | MÉTODO | VALOR |
|---|------------|----------|
| Radiación solar, Q_{adm} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Ec. (4.1) | 688,43 |
| Irradiación solar incidente en el colector $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Ec. (4.2) | 848,97 |
| Irradiación solar incidente en la parte superior, S_{sup} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Ec. (4.3) | 588,6077 |
| Irradiación solar incidente en la parte inferior, S_{inf} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Ec. (4.4) | 260,360 |
| Factor de visión del cuerpo 3 al cuerpo 2, | Ec. (4.5) | 0,8219 |
| Calor útil, Q_u $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Ec. (4.6) | 492,09 |
| Calor pérdidas, Q_R $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Ec. (4.7) | 109,50 |
| Pérdidas de calor total, U $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$ | Ec. (4.8) | 4,562 |
| Pérdidas de calor en el exterior, $U_{exterior}$ $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$ | Ec. (4.9) | 23,96 |
| Resistencia por convección, R_1 $\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}\right]$ | Ec. (4.10) | 0,04243 |
| Ambiente convectivo exterior, h_{conv} $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$ | Ec. (4.11) | 23,57 |
| Número de Nusselt, Nu | Ec. (4.12) | 44,53 |
| Número de Reynolds, Re | Ec. (4.13) | 6960,15 |
| Resistencia por radiación (exterior), R_2 $\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}\right]$ | Ec. (4.16) | 2,5616 |
| Ambiente convectivo por radiación, h_{rad} $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$ | Ec. (4.17) | 0,39038 |
| Temperatura equivalente del cielo, T_{cielo} $[^\circ K]$ | Ec. (4.18) | 267,55 |
| Resistencia en el exterior, $R_{exterior}$ $\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}\right]$ | Ec. (4.19) | 0,04173 |
| Pérdidas de calor por conducción $U_{conducción}$ $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$ | Ec. (4.20) | 43,17 |
| Resistencia por conducción, $R_{conducción}$ $\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}\right]$ | Ec. (4.21) | 0,02316 |
| Pérdidas de calor por radiación en el interior $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$ | Ec. (4.23) | 6,48 |
| Resistencia por radiación en el vacío $\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W}\right]$ | Ec. (4.24) | 0,15 |
| Ambiente convectivo por radiación en el vacío $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$ | Ec. (4.25) | 6,48 |
| Eficiencia, η | Ec. (4.26) | 71 |

4.4 Estandarización del sistema térmico

La estandarización nos ayuda para que los datos puedan ser utilizados en función a varios criterios. Esta consiste, en separar la información en diferentes campos, así como unificar ciertos criterios para un mejor manejo y manipulación de los datos.

De esta manera es importante la estandarización del equipo, y con todas las consultas realizadas, esto nos permite plantear una estandarización de paneles solares de tubos al vacío con tecnología termosifón para calentamiento de agua en base a las siguientes variables:

- Potencial solar
- Área de captación solar
- Caudal de agua a utilizar

A continuación se tiene la estandarización del equipo, determinando el área de captación solar en función del potencial solar y del caudal de agua a utilizar.

NOTA es importante aclarar que la estandarización del colector de tubos al vacío con tecnología termosifón se realiza con una eficiencia del 71% para una temperatura de salida del agua de 40⁰C. Ec (3.2). La radiación está en función de la localidad. (8), (43)

**TABLA 4.3: ESTANDARIZACIÓN DE COLECTORES SOLARES CON
TECNOLOGÍA TERMOSIFÓN PARA USO DOMÉSTICO (ÁREA)**

| USUARIOS N _o . | CAUDAL (l/día) | AREA (m ²) | A(m ²) | A(m ²) | A(m ²) | A(m ²) | A(m ²) |
|------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | Radiació 200W/m ² | S 400W/m ² | S 600W/m ² | S 688,43W/m ² | S 800W/m ² | S 1000W/m ² |
| 1 | 50 | 0,57 | 0,41 | 0,32 | 0,29 | 0,26 | 0,22 |
| 2 | 100 | 1,13 | 0,81 | 0,63 | 0,58 | 0,52 | 0,44 |
| 3 | 150 | 1,70 | 1,22 | 0,95 | 0,86 | 0,78 | 0,66 |
| 4 | 200 | 2,27 | 1,62 | 1,27 | 1,15 | 1,04 | 0,88 |
| 5 | 250 | 2,84 | 2,03 | 1,58 | 1,44 | 1,30 | 1,10 |
| 6 | 300 | 3,40 | 2,44 | 1,90 | 1,73 | 1,55 | 1,32 |
| 7 | 350 | 3,97 | 2,84 | 2,21 | 2,02 | 1,81 | 1,54 |
| 8 | 400 | 4,54 | 3,25 | 2,53 | 2,31 | 2,07 | 1,75 |
| 9 | 450 | 5,10 | 3,66 | 2,85 | 2,59 | 2,33 | 1,97 |
| 10 | 500 | 5,67 | 4,06 | 3,16 | 2,88 | 2,59 | 2,19 |
| 11 | 550 | 6,24 | 4,47 | 3,48 | 3,17 | 2,85 | 2,41 |
| 12 | 600 | 6,81 | 4,87 | 3,80 | 3,46 | 3,11 | 2,63 |
| 13 | 650 | 7,37 | 5,28 | 4,11 | 3,75 | 3,37 | 2,85 |
| 14 | 700 | 7,94 | 5,69 | 4,43 | 4,03 | 3,63 | 3,07 |
| 15 | 750 | 8,51 | 6,09 | 4,74 | 4,32 | 3,89 | 3,29 |
| 16 | 800 | 9,07 | 6,50 | 5,06 | 4,61 | 4,14 | 3,51 |
| 17 | 850 | 9,64 | 6,90 | 5,38 | 4,90 | 4,40 | 3,73 |
| 18 | 900 | 10,21 | 7,31 | 5,69 | 5,19 | 4,66 | 3,95 |
| 19 | 950 | 10,78 | 7,72 | 6,01 | 5,47 | 4,92 | 4,17 |
| 20 | 1000 | 11,34 | 8,12 | 6,33 | 5,76 | 5,18 | 4,39 |
| 25 | 1250 | 14,18 | 10,15 | 7,91 | 7,20 | 6,48 | 5,48 |
| 50 | 2500 | 28,36 | 20,31 | 15,82 | 14,41 | 12,95 | 10,97 |
| 75 | 3750 | 42,53 | 30,46 | 23,72 | 21,61 | 19,43 | 16,45 |
| 100 | 5000 | 56,71 | 40,61 | 31,63 | 28,82 | 25,90 | 21,93 |
| 125 | 6250 | 70,89 | 50,77 | 39,54 | 36,02 | 32,38 | 27,42 |
| 150 | 7500 | 85,07 | 60,92 | 47,45 | 43,22 | 38,86 | 32,90 |
| 175 | 8750 | 99,25 | 71,07 | 55,36 | 50,43 | 45,33 | 38,38 |
| 200 | 10000 | 113,42 | 81,23 | 63,27 | 57,63 | 51,81 | 43,87 |

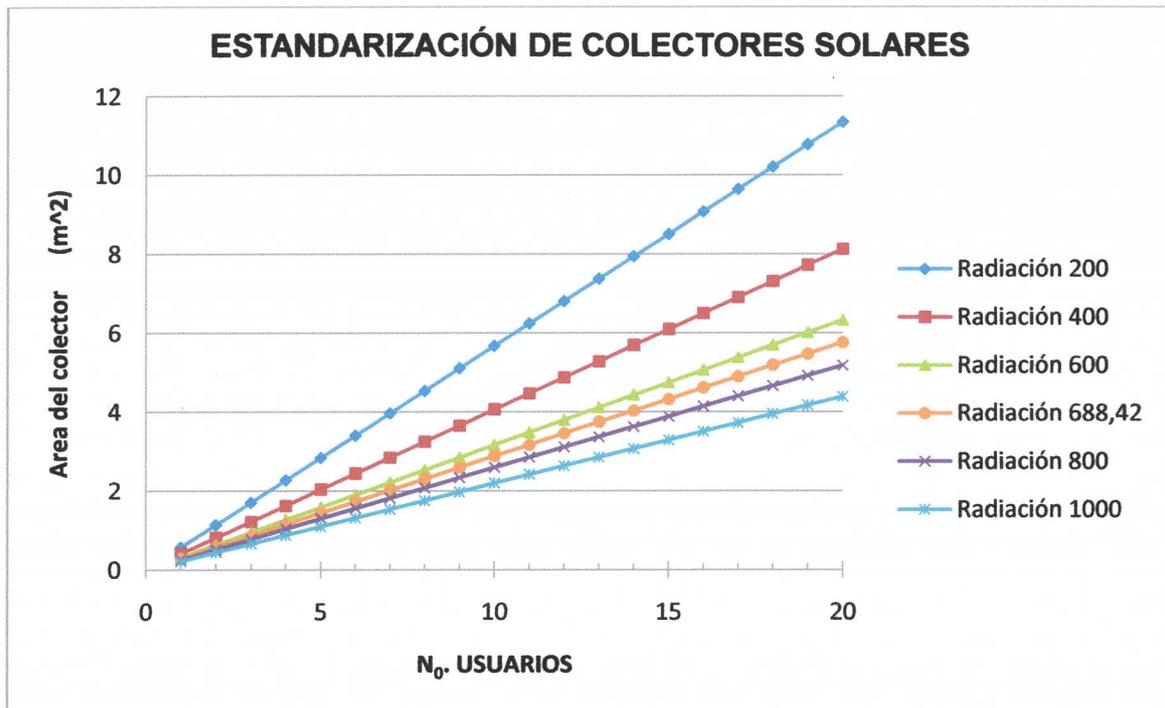


Fig. 4.4: Estandarización de colectores solares con tecnología termosifón para uso doméstico (área - 20 personas)

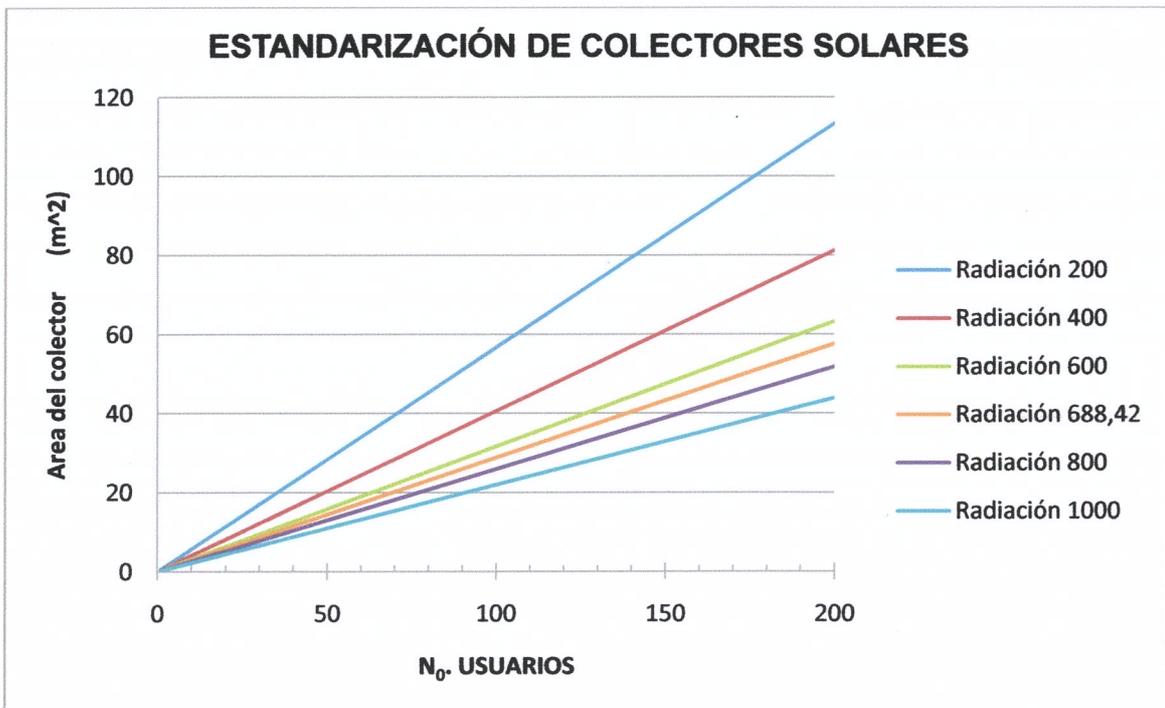


Fig. 4.5: Estandarización de colectores solares con tecnología termosifón uso comercial (área - 200 personas)

Para encontrar el número de tubos es necesario determinar las dimensiones del área del colector. Una vez determinadas estas, se calcula con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\left(\frac{A}{1,04} + 1000\right) + 18}{65} \quad (4.27)$$

TABLA 4.4: ESTANDARIZACIÓN DE COLECTORES SOLARES CON TECNOLOGÍA TERMOSIFÓN PARA USO DOMÉSTICO (N° DE TUBOS)

| USUARIOS | CAUDAL | AREA (m ²) | A (m ²) | A(m ²) | A(m ²) | A(m ²) | A(m ²) |
|------------------|---------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| N ₀ . | (l/día) | Radiación 200W/m ² | S 400W/m ² | S 600W/m ² | S 688,43W/m ² | S 800W/m ² | S 1000W/m ² |
| 1 | 50 | 9 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 2 | 100 | 17 | 12 | 10 | 9 | 8 | 7 |
| 3 | 150 | 25 | 18 | 14 | 13 | 12 | 10 |
| 4 | 200 | 34 | 24 | 19 | 17 | 16 | 13 |
| 5 | 250 | 42 | 30 | 24 | 22 | 19 | 16 |
| 6 | 300 | 51 | 36 | 28 | 26 | 23 | 20 |
| 7 | 350 | 59 | 42 | 33 | 30 | 27 | 23 |
| 8 | 400 | 67 | 48 | 38 | 34 | 31 | 26 |
| 9 | 450 | 76 | 54 | 42 | 39 | 35 | 29 |
| 10 | 500 | 84 | 60 | 47 | 43 | 39 | 33 |
| 11 | 550 | 93 | 66 | 52 | 47 | 42 | 36 |
| 12 | 600 | 101 | 72 | 56 | 51 | 46 | 39 |
| 13 | 650 | 109 | 78 | 61 | 56 | 50 | 42 |
| 14 | 700 | 118 | 84 | 66 | 60 | 54 | 46 |
| 15 | 750 | 126 | 90 | 70 | 64 | 58 | 49 |
| 16 | 800 | 135 | 96 | 75 | 68 | 62 | 52 |
| 17 | 850 | 143 | 102 | 80 | 73 | 65 | 55 |
| 18 | 900 | 151 | 108 | 85 | 77 | 69 | 59 |
| 19 | 950 | 160 | 114 | 89 | 81 | 73 | 62 |
| 20 | 1000 | 168 | 120 | 94 | 86 | 77 | 65 |
| 25 | 1250 | 210 | 150 | 117 | 107 | 96 | 81 |
| 50 | 2500 | 420 | 301 | 234 | 213 | 192 | 163 |
| 75 | 3750 | 629 | 451 | 351 | 320 | 288 | 244 |
| 100 | 5000 | 839 | 601 | 468 | 427 | 383 | 325 |
| 125 | 6250 | 1049 | 751 | 585 | 533 | 479 | 406 |
| 150 | 7500 | 1259 | 901 | 702 | 640 | 575 | 487 |
| 175 | 8750 | 1468 | 1052 | 819 | 746 | 671 | 568 |
| 200 | 10000 | 1678 | 1202 | 936 | 853 | 767 | 649 |

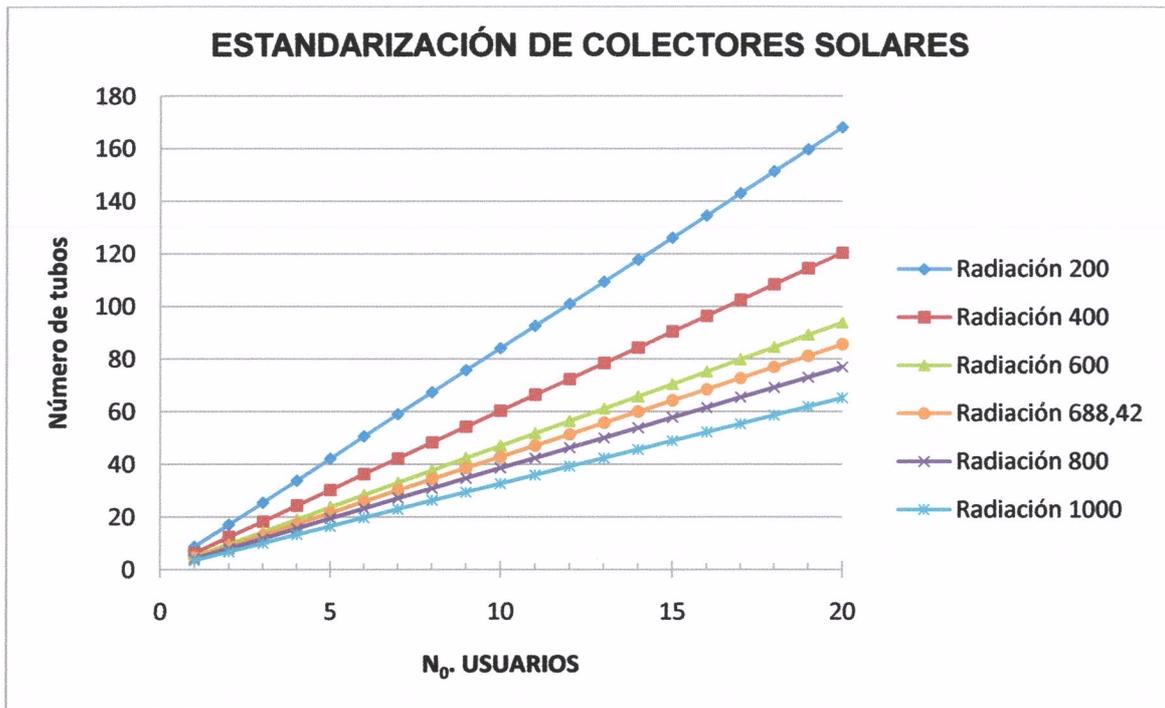


Fig. 4.6: Estandarización de colectores solares con tecnología termosifón uso doméstico (número de tubos – 20 personas)

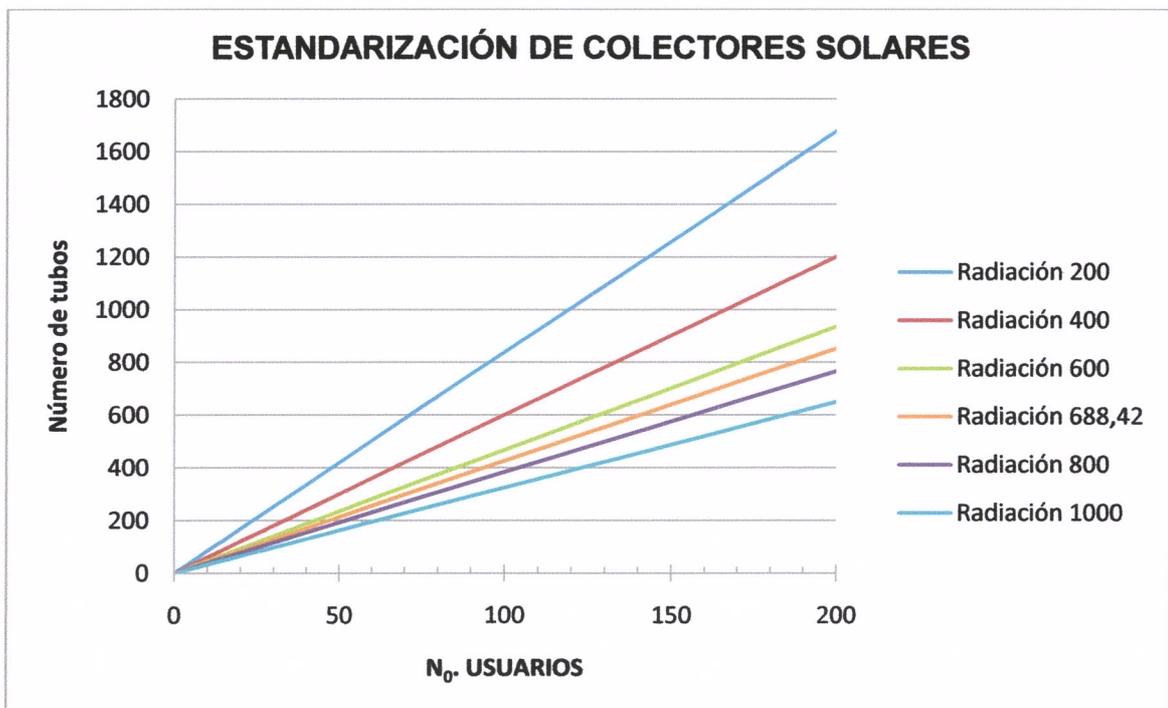


Fig. 4.7: Estandarización de colectores solares con tecnología termosifón uso comercial (número de tubos – 200 personas)

CAPÍTULO V

5. FUNCIONAMIENTO Y COSTOS DEL EQUIPO

5.1 Esquemas de sistema de calentamiento de agua



Fig. 5.1: Estructura soporte y placas reflectoras



Fig. 5.2: Estructura soporte en conjunto con el reservorio



Fig. 5.3: Estructura, reservorio, y tubos al vacío con sus respectivos empaques



Fig. 5.4: Colocación de los tubos de borosilicato en el equipo



Fig. 5.5: El equipo con el reservorio de agua fría



Fig. 5.6: Colector solar armado completamente con sus respectivas conexiones

5.2 Posición e inclinación del equipo

Toda superficie plana es válida siempre y cuando no contenga irregularidades como clavos, chapas cortantes, tejas con aristas puntiagudas, etc; es decir, elementos que puedan dañar los paneles por sí mismos o en conjunción con los pequeños movimientos debidos a las dilataciones térmicas y a las vibraciones causadas por el viento, provocando en este caso una lenta abrasión (34). Se debe elegir una superficie libre de sombra, direccionada al Norte.

El ángulo de inclinación está relacionado con la latitud geográfica del lugar en el que se va a instalar el equipo, en nuestro caso deberá estar en un rango de 10° a 15° y como nos encontramos en el hemisferio Sur la inclinación deberá ser hacia el hemisferio Norte. El ángulo más recomendado es de 11° para nuestro país. (8)

5.3 Instalación del sistema

5.3.1 Partes del equipo

Planos

5.3.2 Herramientas a utilizar

Para el montaje de la estructura, sin considerar la instalación hidráulica, se requiere de al menos las siguientes herramientas de mano.

- Llave ajustable de al menos 8 pulgadas de largo.
- Llave de tuercas de 10 mm



Fig. 5.7 Herramientas



5.3.3 Manual de instalación

1. Estructura

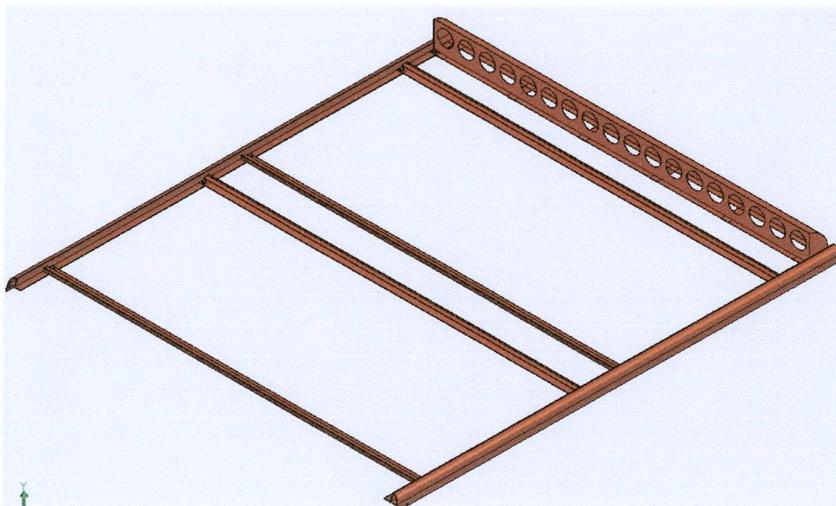


Fig. 5.8 Ensamble estructura

- Se debe sujetar con pernos los perfiles principales con el soporte para tubos.
- Se coloca al ensamble anterior con pernos los perfiles transversales.

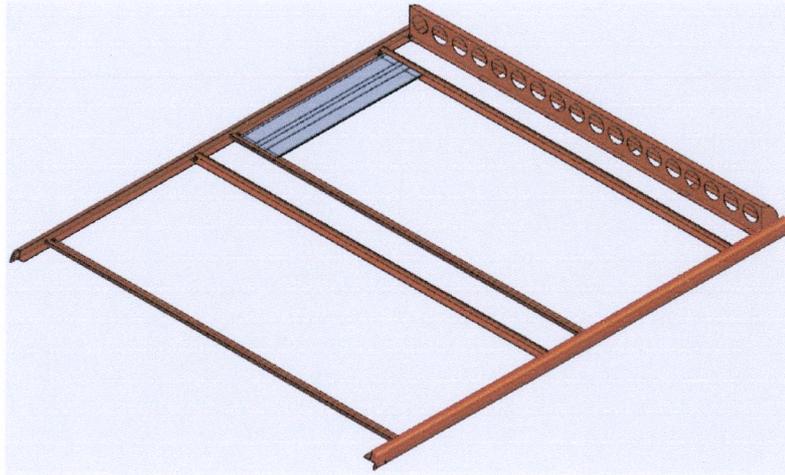


Fig. 5.9 Montaje de las planchas de aluminio

- Colocar las placas de aluminio como se indica en la figura.

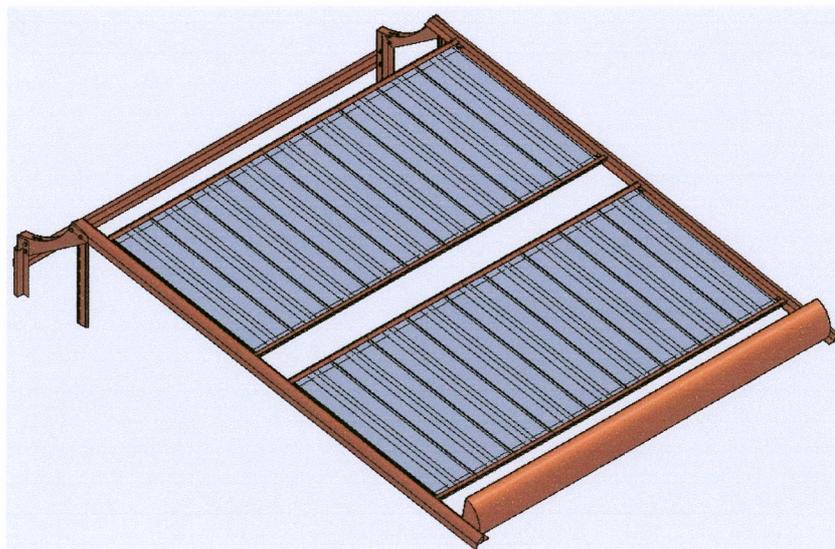


Fig. 5.10 Montaje de las patas

- Una vez terminado de colocar las placas de aluminio se procede a colocar el soporte curvo con sus respectivas patas.
- Se debe colocar el tensor en las patas posteriores de la estructura como se observa en la figura.

2. Reservorio de agua caliente

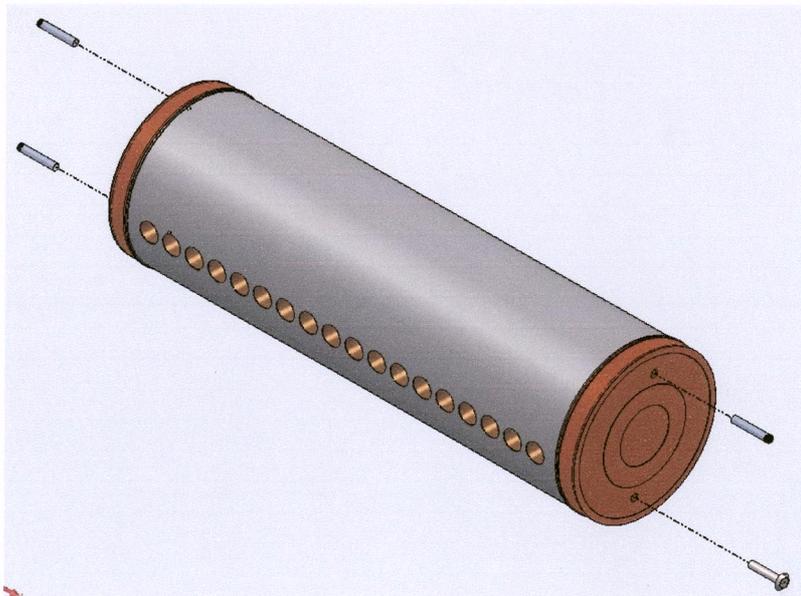


Fig. 5.11 Reservorio aislado

- Quitar las tapas de plástico de los costados del reservorio, dos superiores y una inferior.
- En las entradas del reservorio abiertas se debe colocar uniones para las tuberías.

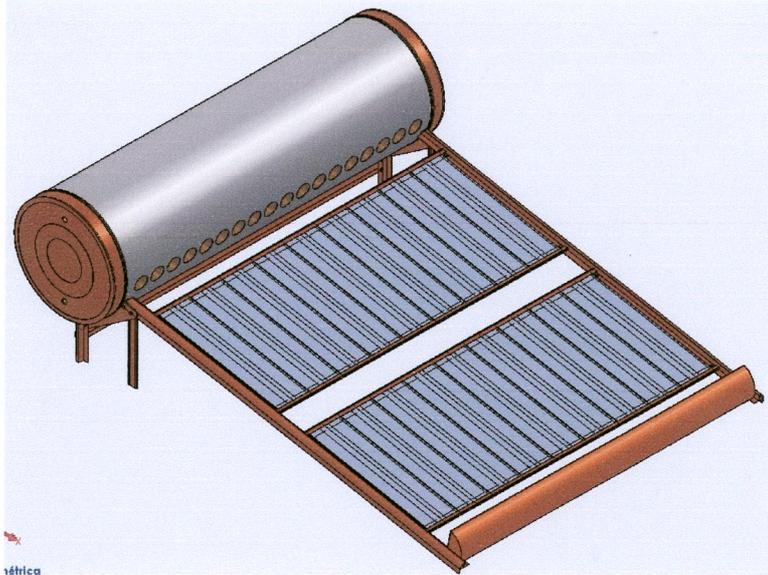


Fig. 5.12 Reservorio aislado colocado en la estructura

- Se debe fijar el reservorio en la estructura como se observa en la figura.

3. Tubos y empaques

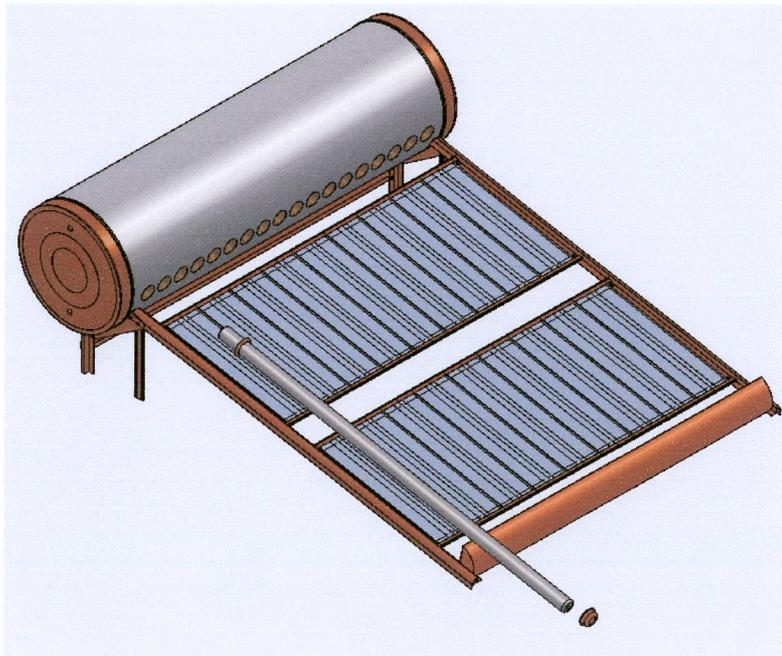


Fig. 5.13 Tubos al vacio con empaques

- Se debe lubricar la parte superior de los tubos con agua y jabón para disminuir la fricción entre el tubo y el empaque del reservorio.
- Para colocar el tubo en el reservorio se debe poner los empaques superior e inferior, el uno en la unión del tubo con el reservorio y el otro entre el tubo y el soporte de tubos.

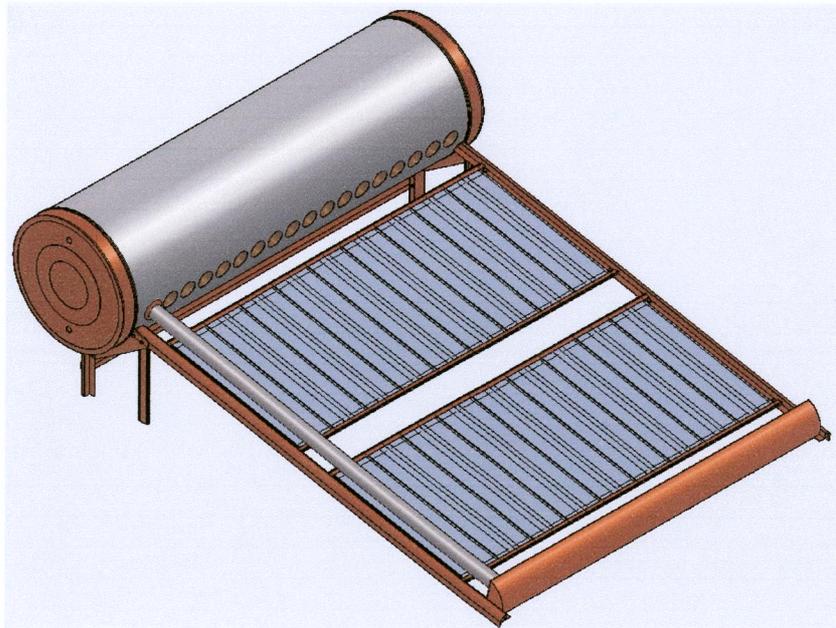


Fig. 5.14 Montaje de los tubos al vacío

- Se procede a colocar los tubos con sus empaques en los agujeros del reservorio. Se debe tener cuidado ya que son frágiles.

4. Reservorio de agua fría

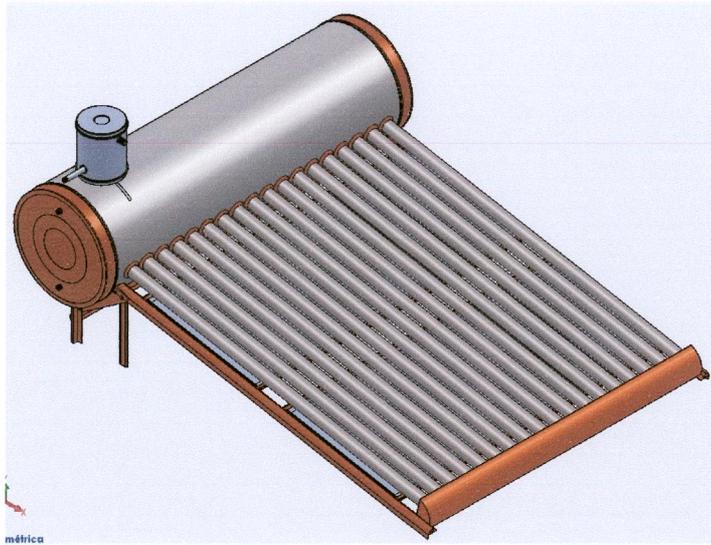


Fig. 5.15 Montaje del reservorio de agua fría

- El reservorio de agua fría viene listo para ser instalado con sus respectivos elementos, se debe fijar sobre el reservorio de agua caliente con remaches o tornillos.

5. Colocación de tuberías

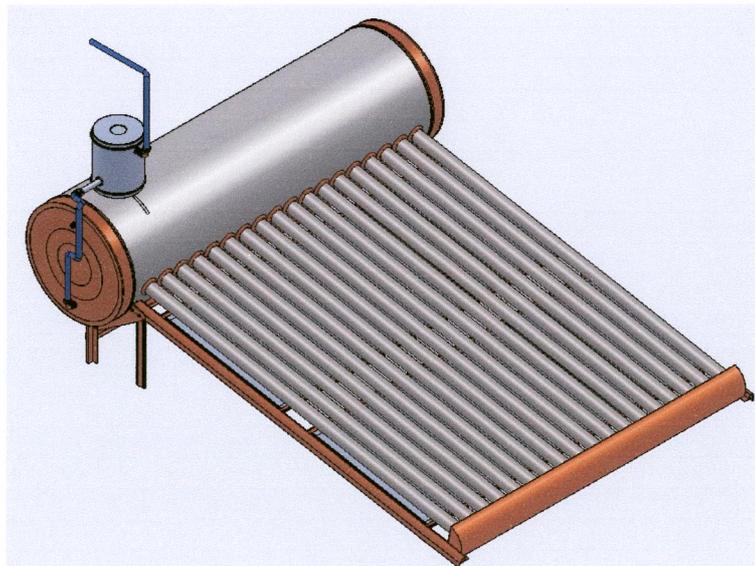


Fig. 5.16 Tuberías de agua fría

- Se procede a colocar la alimentación de agua fría al reservorio superior. De la salida de este reservorio se conecta a la parte inferior del reservorio aislado con la ayuda de codos, uniones y tuberías. Se debe instalar de esta forma por el principio de funcionamiento del sistema.

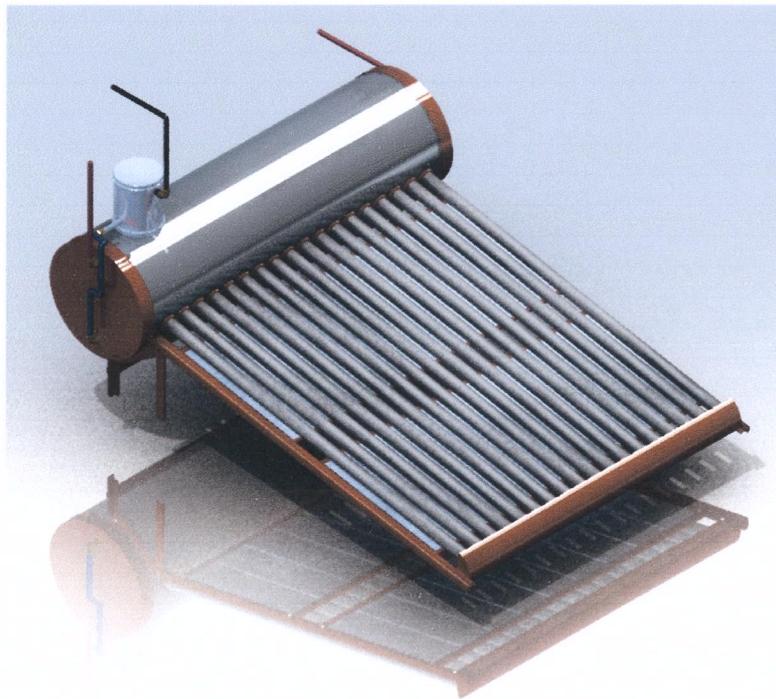


Fig. 5.17 Tuberías de agua caliente

- Se conecta la tubería de agua caliente en la salida superior al lado opuesto de la entrada de agua fría, esta tubería estará conectada donde se requiera el agua caliente. Además se instala una tubería en forma vertical que sirve como desfogue en caso de aumentar la presión del sistema, esta deberá estar ubicada en la parte superior del reservorio donde se encuentra la más alta temperatura.

5.3.4 Mantenimiento del equipo

Limpieza

Se debe mantener limpios los tubos, ya que existe polvo, smog y ceniza y junto al agua puede ocasionar cierta pañosidad en los tubos. Se debe realizar esta limpieza en dependencia del lugar en el que está expuesto el equipo.

Tubos rotos

Si un tubo al vacío de su sistema se rompe, contacte con su proveedor de servicio y reemplácelo lo antes posible ya que al poner en contacto el aislante con el agua, este perderá sus propiedades.

Alta temperatura

Es importante dar el debido mantenimiento a los equipos que no se encuentren utilizando continuamente ya que si no se tiene una alimentación continua de agua fría, los tubos al estar expuestos a la radiación solar directa estos elevarán a temperaturas incluso de 100°C y con ello se evaporará el agua, exponiendo los tubos a fracturas por la elevación de la temperatura interna.

Aislamiento

Verificar el aislamiento de las tuberías ya que si se encuentra en mal estado estaremos perdiendo eficiencia del sistema.

5.4 Pruebas y funcionamiento del sistema

Para la comprobación del funcionamiento con diferentes valores de radiación solar disponible, incluyendo estados críticos, es necesaria la realización práctica de pruebas.

Para unos meses de funcionamiento, la instalación del calentador ha funcionado según lo previsto y no ha tenido problemas. Se han probado en días nublados, días totalmente despejados.

Se comprobó que el calentador funciona perfectamente con 11° de inclinación,

Las pruebas realizadas están tabuladas en base a la intensidad de radiación, e irán variando respectivamente con el transcurso del tiempo y estas son:

- Día soleado
- Día claro
- Día nublado

Día soleado: consiste en un cielo totalmente despejado, para que el sol brille y amplifique el poder de los rayos. En nuestro caso en base a las pruebas realizadas podemos decir que un día soleado es aquel en el que tenemos una

radiación de $650 \frac{w}{m^2}$ en adelante. Estos días serán de alta radiación solar disponible.

Día claro: consiste en un cielo medianamente despejado, con un poco de nubosidad por momentos, el sol brilla pero no con su mayor esplendor. En nuestro caso en base a las pruebas realizadas podemos decir que un día claro es aquel en el que tenemos una radiación de $500 \frac{w}{m^2}$ a $650 \frac{w}{m^2}$. Estos días serán de mediana radiación solar disponible.

Día nublado: consiste en un cielo totalmente cubierto por nubes, el sol está oculto pero a pesar de esto existe la presencia de radiación difusa. En nuestro caso en base a las pruebas realizadas podemos decir que un día nublado es aquel en el que tenemos una radiación de $500 \frac{w}{m^2}$ o valores menores a este. Estos días serán de baja radiación solar disponible.

NOTA: Es importante aclarar que las pruebas son realizadas para las situaciones más críticas, como es cuando no existe un remanente de agua caliente para el día siguiente, es decir cuando los 130 libras de agua se terminan en un día y para un día siguiente se empieza con la temperatura del agua de 16 a 18 °C.

TABLA 5.1: TEMPERATURA DEL AGUA VS TIEMPO DE CALENTAMIENTO
DIA SOLEADO

| HORA/DIA | 06/05/2010 | 10/05/2010 | 15/05/2010 | 16/05/2010 | PROMEDIO |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 08H00 | 16 | 17 | 18 | 17 | 17 |
| 08H30 | 17 | 18 | 18 | 19 | 18 |
| 09H00 | 18 | 18 | 19 | 20 | 18,75 |
| 09H30 | 20 | 22 | 23 | 24 | 22,25 |
| 10H00 | 24 | 25 | 28 | 29 | 26,5 |
| 10H30 | 27 | 29 | 32 | 32 | 30 |
| 11H00 | 30 | 31 | 36 | 35 | 33 |
| 11H30 | 34 | 35 | 40 | 38 | 36,75 |
| 12H00 | 39 | 39 | 44 | 41 | 40,75 |
| 12h30 | 41 | 43 | 47 | 45 | 44 |
| 13H00 | 46 | 47 | 50 | 48 | 47,75 |
| 13H30 | 50 | 51 | 54 | 51 | 51,5 |
| 14H00 | 56 | 55 | 58 | 56 | 56,25 |
| 14H30 | 61 | 59 | 63 | 65 | 62 |
| 15H00 | 65 | 64 | 67 | 69 | 66,25 |
| 15H30 | 69 | 68 | 71 | 72 | 70 |
| 16H00 | 73 | 73 | 73 | 74 | 73,25 |
| 16H30 | 75 | 75 | 74 | 76 | 75 |
| 17H00 | 75 | 75 | 74 | 75 | 74,75 |
| 17H30 | 75 | 75 | 74 | 73 | 74,25 |
| 18H00 | 75 | 75 | 74 | 73 | 74,25 |
| 18H30 | 74 | 74 | 74 | 73 | 73,75 |
| 19H00 | 74 | 74 | 74 | 72 | 73,5 |

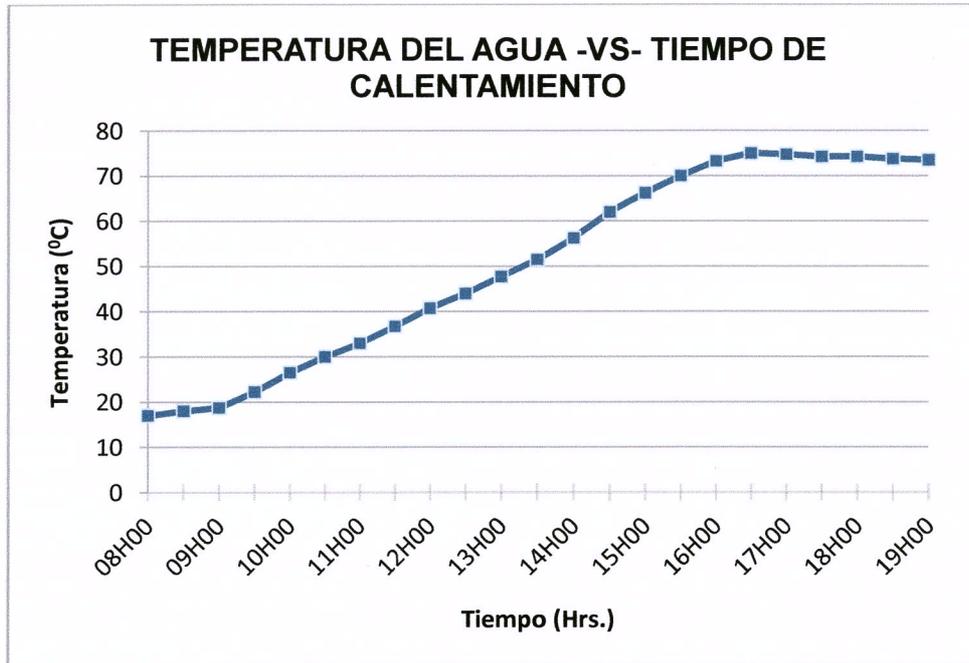


Fig. 5.18. Calentamiento del agua – tiempo (alta insolación)

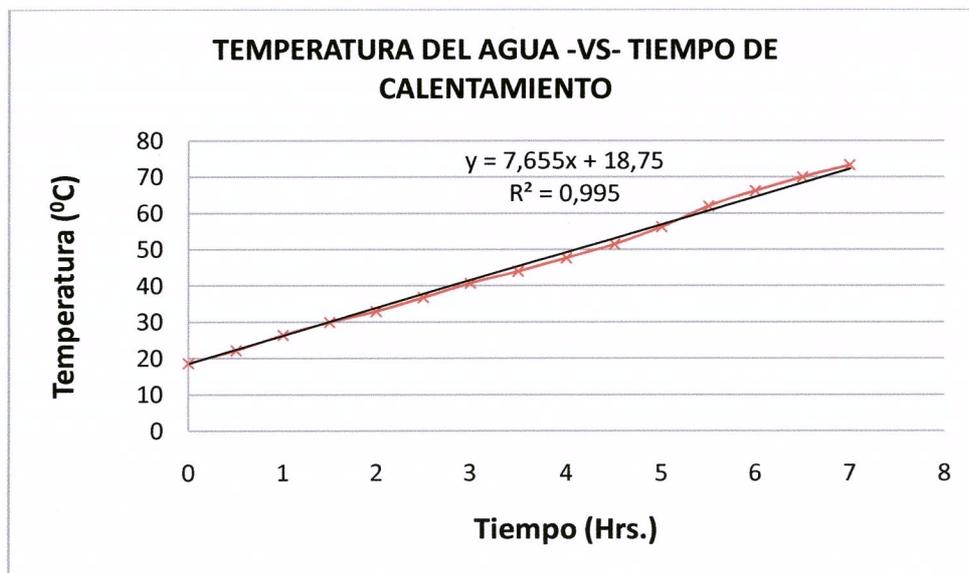


Fig. 5.19. Pendiente de la curva para día soleado

TABLA 5.2: TEMPERATURA DEL AGUA VS TIEMPO DE CALENTAMIENTO

DIA CLARO

| DIA/HORA | 03/05/2010 | 08/05/2010 | 09/05/2010 | 12/05/2010 | PROMEDIO |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 08H00 | 18 | 17 | 16 | 17 | 17 |
| 08H30 | 18 | 18 | 16 | 18 | 17,5 |
| 09H00 | 19 | 18 | 17 | 19 | 18,25 |
| 09H30 | 20 | 19 | 17 | 20 | 19 |
| 10H00 | 24 | 21 | 20 | 22 | 21,75 |
| 10H30 | 27 | 24 | 22 | 25 | 24,5 |
| 11H00 | 30 | 29 | 25 | 29 | 28,25 |
| 11H30 | 33 | 31 | 29 | 33 | 31,5 |
| 12H00 | 37 | 36 | 32 | 36 | 35,25 |
| 12h30 | 40 | 40 | 37 | 40 | 39,25 |
| 13H00 | 43 | 42 | 40 | 43 | 42 |
| 13H30 | 47 | 45 | 44 | 45 | 45,25 |
| 14H00 | 50 | 49 | 49 | 49 | 49,25 |
| 14H30 | 54 | 52 | 52 | 51 | 52,25 |
| 15H00 | 57 | 56 | 55 | 55 | 55,75 |
| 15H30 | 60 | 61 | 59 | 57 | 59,25 |
| 16H00 | 63 | 64 | 63 | 60 | 62,5 |
| 16H30 | 66 | 66 | 64 | 63 | 64,75 |
| 17H00 | 67 | 66 | 64 | 63 | 65 |
| 17H30 | 66 | 66 | 63 | 64 | 64,75 |
| 18H00 | 66 | 66 | 63 | 64 | 64,75 |
| 18H30 | 65 | 66 | 63 | 64 | 64,5 |
| 19H00 | 65 | 66 | 63 | 64 | 64,5 |

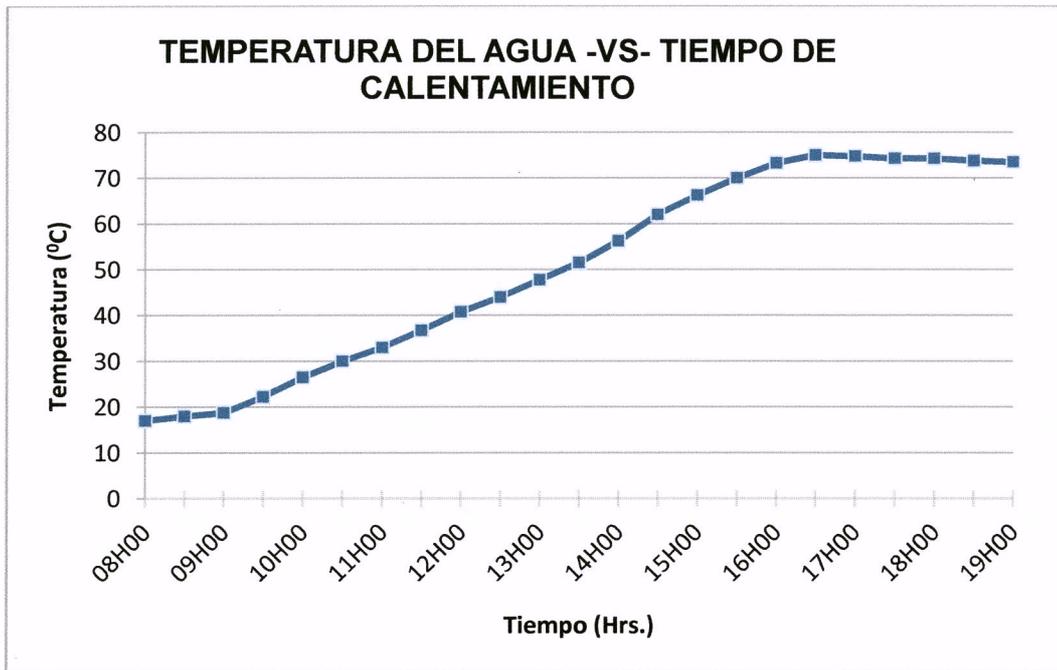


Fig. 5.20. Calentamiento del agua – tiempo (media insolación)

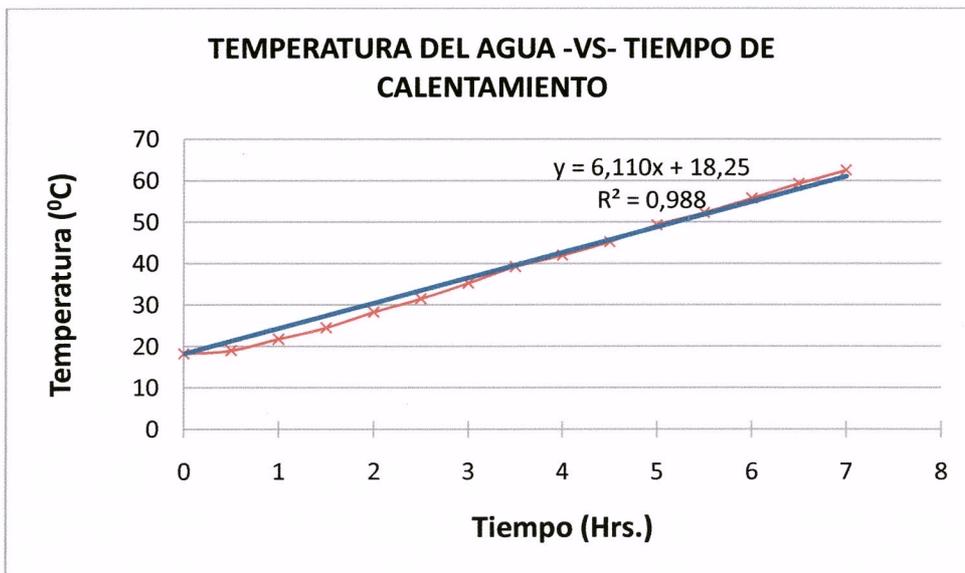


Fig. 5.21. Pendiente de la curva para día Claro

TABLA 5.3: TEMPERATURA DEL AGUA VS TIEMPO DE CALENTAMIENTO

DIA NUBLADO

| DIA/HORA | 29/03/2010 | 30/03/2010 | 01/04/2010 | 08/03/2009 | PROMEDIO |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 08H00 | 16 | 16 | 17 | 16 | 16,3 |
| 08H30 | 16 | 16 | 17 | 17 | 16,5 |
| 09H00 | 16 | 17 | 19 | 17 | 17,3 |
| 09H30 | 19 | 18 | 19 | 19 | 18,8 |
| 10H00 | 23 | 21 | 20 | 21 | 21,3 |
| 10H30 | 26 | 25 | 23 | 25 | 24,8 |
| 11H00 | 30 | 28 | 26 | 27 | 27,8 |
| 11H30 | 33 | 31 | 29 | 30 | 30,8 |
| 12H00 | 34 | 34 | 31 | 33 | 33,0 |
| 12h30 | 34 | 35 | 32 | 36 | 34,3 |
| 13H00 | 36 | 36 | 35 | 39 | 36,5 |
| 13H30 | 37 | 36 | 38 | 41 | 38,0 |
| 14H00 | 40 | 39 | 41 | 42 | 40,5 |
| 14H30 | 43 | 40 | 44 | 42 | 42,3 |
| 15H00 | 46 | 43 | 46 | 45 | 45,0 |
| 15H30 | 47 | 48 | 47 | 48 | 47,5 |
| 16H00 | 49 | 51 | 50 | 51 | 50,3 |
| 16H30 | 51 | 53 | 52 | 53 | 52,3 |
| 17H00 | 52 | 53 | 53 | 54 | 53,0 |
| 17H30 | 52 | 53 | 52 | 54 | 52,8 |
| 18H00 | 52 | 52 | 52 | 54 | 52,5 |
| 18H30 | 52 | 52 | 52 | 52 | 52,0 |
| 19H00 | 51 | 52 | 52 | 52 | 51,8 |

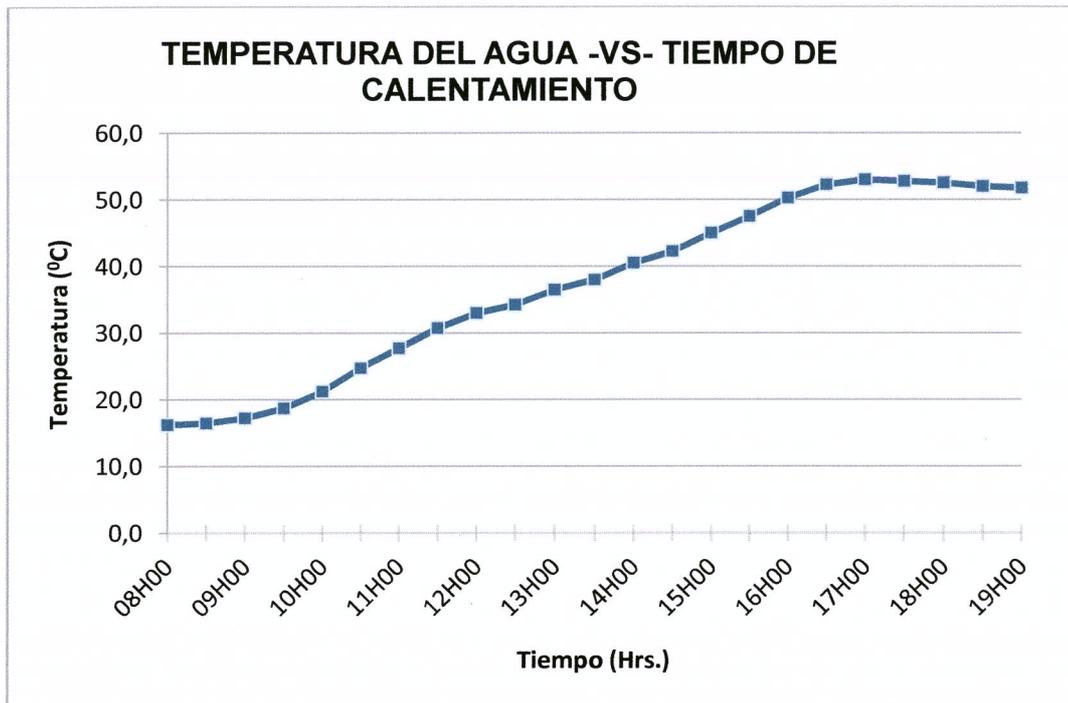


Fig. 5.22. Calentamiento del agua – tiempo (baja insolación)

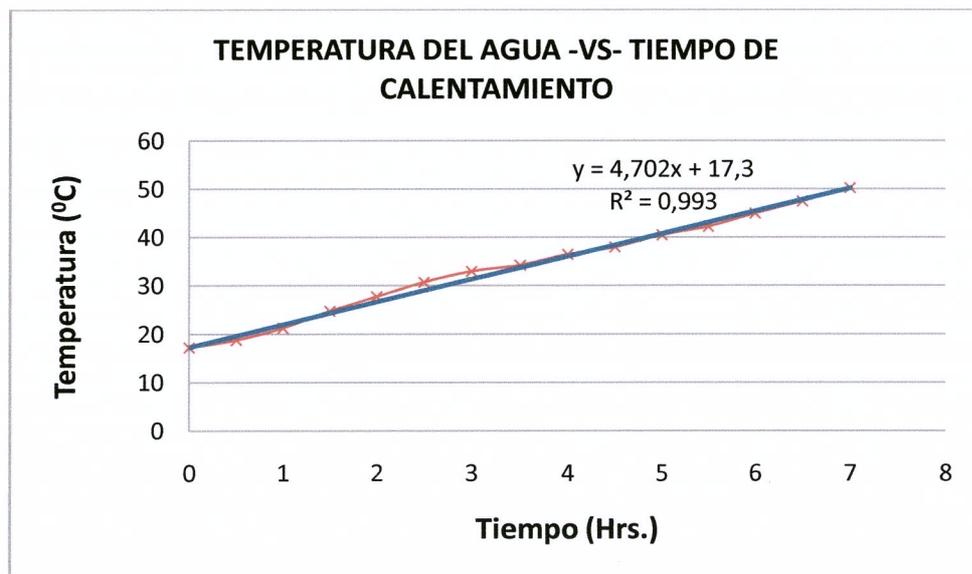


Fig. 5.23. Pendiente de la curva para día nublado

NOTA: Es importante aclarar que la pendiente de las gráficas temperatura Vs tiempo nos da la variación de la energía interna.

5.4.1 Comparación de los cálculos del modelo matemático con los datos obtenidos en las pruebas realizadas en el equipo.

Una manera práctica de comprobar los datos teóricos con los experimentales es realizar un balance de energía, puesto que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma.

El proceso de calentamiento del agua se lo debe analizar como un problema en estado transitorio.

Estado transitorio

En los procesos de estado no estacionario o transitorio nos interesa el valor del estado es decir la variable dependiente en función del tiempo. Se debe recordar que el estado no estacionario se refiere a los procesos en los que las cantidades o las condiciones operativas dentro del sistema cambian con el tiempo. El estado no estacionario es más complicado que el estado estacionario, y en general los problemas que implican procesos en estado no estacionario son más difíciles de formular que aquellos que intervienen procesos en estado estacionario. Sin embargo una amplia variedad de problemas industriales importantes pertenecen a esta categoría.

Energía Interna (42)

Al aumentar la temperatura de un sistema, sin que varíe nada más, aumenta su energía interna reflejado en el aumento del calor del sistema completo o de la materia estudiada.

Convencionalmente, cuando se produce una variación de la energía interna manifestada en la variación del calor que puede ser cedido, mantenido o absorbido se puede medir este cambio en la energía interna indirectamente por la variación de la temperatura de la materia.

Desde el punto de vista de la termodinámica, en un sistema cerrado (o sea, de paredes impermeables) la variación de energía interna es independiente del proceso, sólo depende del estado inicial y final, por lo que se dice que es una función de estado.

Balance de energía

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}} \quad \text{Ec. (5.1)}$$

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{pérdidas}} = E_{\text{almacenada}}$$

$$Q_{\text{útil}} = E_{\text{almacenada}}$$

$$Q_{\text{útil}} = \Delta U$$

Donde:

$$\Delta U = \rho * V * C_v * \frac{dT}{dt} \quad \text{Ec. (5.2)}$$

Donde:

$\Delta U = A$ la variación de la energía interna

$\frac{dT}{dt}$ = la variación de la temperatura con respecto al tiempo.

TABLA 5.4: DATOS PARA LA VARIACIÓN DE LA ENERGÍA INTERNA

| DATOS | VALOR | UNIDADES |
|--------------------------------|--------|---------------------------|
| Densidad | 988,1 | $\frac{kg}{m^3}$ |
| Volumen | 130 | lt |
| Cv | 4181,1 | $\frac{J}{kg * ^\circ K}$ |
| $\frac{dT}{dt}$ (experimental) | 7,67 | $\frac{^\circ K}{h}$ |

Reemplazando en la ecuación 5.2 los datos de la tabla 5.4 se obtiene

(ΔU experimental):

$$\Delta U = 1144,27 W$$

Mientras que el calor útil teórico es: $859,3 \frac{W}{m^2}$ y al multiplicar por el área de los tubos se tiene: $1263,48 W$. Comparando estos valores son muy próximos y se tiene una desviación del 9%.

Se trabajó para la comparación con la pendiente correspondiente a día soleado puesto que la eficiencia es de 72%, comparando con la eficiencia teórica del 71% éste es el valor más cercano.

5.5 Curvas de eficiencia del sistema

Eficiencia es la capacidad de uso racional de los medios con que se cuenta para alcanzar un objetivo determinado, es decir conseguir las metas con el mínimo de recurso y tiempo disponible, logrando una optimización. En un equipo o proceso es la relación que existe entre la energía útil y la energía invertida.

Los individuos y las organizaciones que son consumidores directos de la energía pueden desear ahorrar energía para reducir costos energéticos y promover sostenibilidad económica, política y ambiental. Los usuarios industriales y comerciales pueden desear aumentar eficacia y maximizar así su beneficio. Entre las preocupaciones actuales está el ahorro de energía y el efecto medioambiental de la generación de energía eléctrica.

A continuación se tendrá la curva del rendimiento térmico del sistema se tendrá un comportamiento lineal inverso entre eficiencia del sistema vs gradiente térmico de calentamiento del agua, esta gráfica se analiza con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Q_a - Q_r}{Q_a} \quad \text{Ec. (5.3)}$$

A continuación se tiene la η teórica, η para días soleados, η para días claros y η para días nublados en la tabla 5.5, y en la Fig. 5.24

TABLA 5.5: EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR

| T inicial | T final | Gradiente térmico | n teórico | n soleado | n claro | n nublado |
|-----------|---------|----------------------|-----------|-----------|---------|-----------|
| 16 | 16 | 0 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| 16 | 21 | 5 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,79 |
| 16 | 26 | 10 | 0,78 | 0,78 | 0,77 | 0,77 |
| 16 | 31 | 15 | 0,75 | 0,76 | 0,75 | 0,74 |
| 16 | 36 | 20 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,71 |
| 16 | 40 | 24 | 0,71 | 0,72 | 0,71 | 0,69 |
| 16 | 46 | 30 | 0,69 | 0,69 | 0,68 | 0,66 |
| 16 | 50 | 34 | 0,67 | 0,67 | 0,66 | 0,63 |
| 16 | 56 | 40 | 0,64 | 0,65 | 0,63 | 0,60 |
| 16 | 61 | 45 | 0,62 | 0,63 | 0,61 | 0,57 |
| 16 | 66 | 50 | 0,60 | 0,60 | 0,59 | 0,55 |
| 16 | 71 | 55 | 0,58 | 0,58 | 0,57 | 0,52 |
| 16 | 76 | 60 | 0,56 | 0,56 | 0,54 | 0,49 |
| 16 | 81 | 65 | 0,53 | 0,54 | 0,52 | 0,46 |

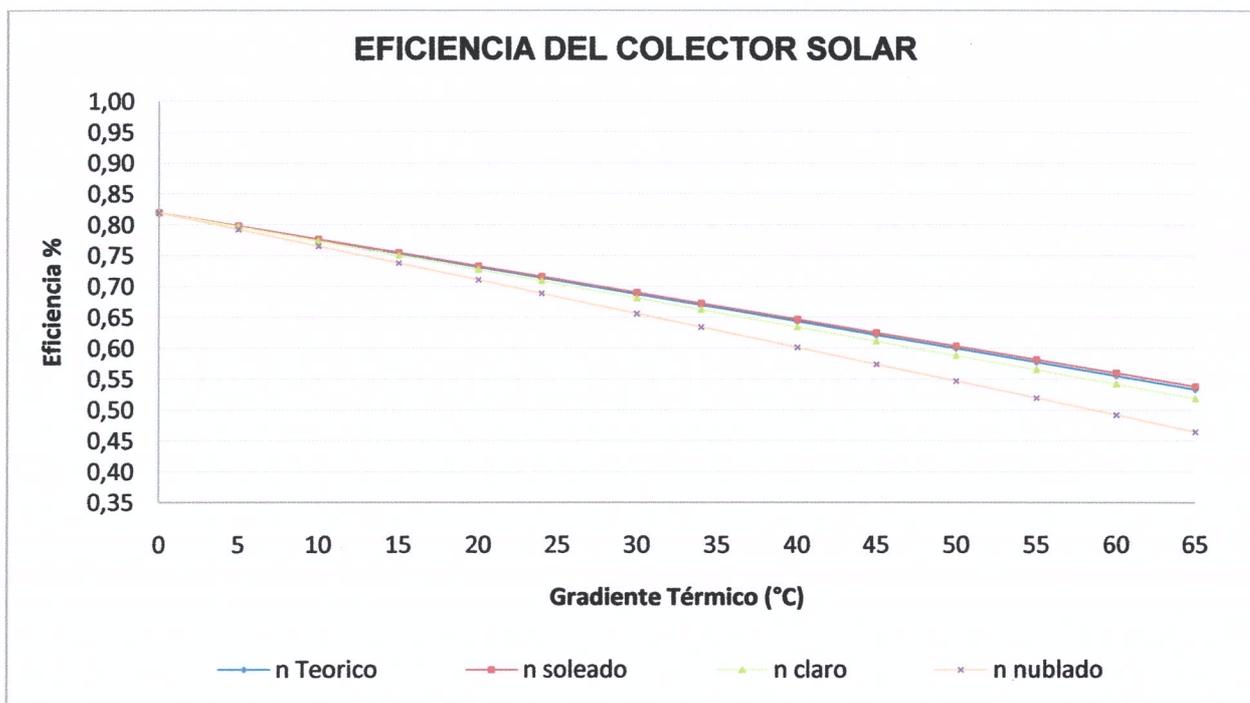


Fig. 5.24. Eficiencia % – Gradiente térmico

5.6 Análisis comparativo de los materiales

Se debe aclarar que el colector solar en si son solo los tubos al vacío pero como se debe analizar los materiales que se pudiese cambiar para tener una mayor eficiencia, se analizará a todo el sistema y las dos posibilidades que existe para mejorar dicha eficiencia es el cambiar el material de:

- Aislante del reservorio
- Planchas reflectoras

5.6.1 Análisis de los materiales aislantes para el reservorio

5.6.1.1 Pérdidas de Calor



Fig. 5.25. Sección C - C en el reservorio

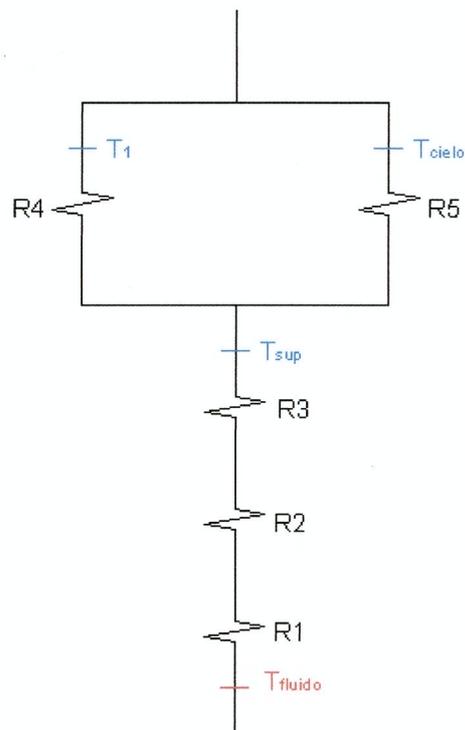


Fig. 5.26. Circuito térmico equivalente en el reservorio

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_{ext} \quad \text{Ec. (5.4)}$$

Donde:

$R_1 = \text{resistencia por conducción en el cilindro interior} \left[\frac{^{\circ}\text{K}}{\text{W}} \right]$

$$R_1 = \frac{\ln(r_0/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot l} \quad \text{Ec. (5.5)}$$

$R_2 = \text{resistencia por conducción en el aislante} \left[\frac{^{\circ}\text{K}}{\text{W}} \right]$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_i + e_a}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot l} \quad \text{Ec. (5.6)}$$

Donde:

$e_a = \text{espesor de aislante [mm]}$

$R_3 = \text{resistencia por conducción en el cilindro exterior} \left[\frac{^{\circ}\text{K}}{\text{W}} \right]$

$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_i + e_a + e_1}{r_i + e_a}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot l} \quad \text{Ec. (5.7)}$$

Donde:

$e_1 = \text{espesor del cilindro exterior [mm]}$

$R_{ext} = \text{resistencia por convección y radiación en el exterior} \left[\frac{^{\circ}\text{K}}{\text{W}} \right]$

$$R_{ext} = \frac{R_4 * R_5}{R_4 + R_5} \quad \text{Ec. (5.8)}$$

Donde:

$R_4 =$ resistencia por convección en el exterior

$$R_4 = \frac{1}{h_{conv} * A} \quad \text{Ec. (5.9)}$$

Donde:

$h_{conv} =$ se calcula con la ecuación 4.11

$R_5 =$ resistencia por radiación en el exterior

$$R_5 = \frac{1}{h_{rad} * A} \quad \text{Ec. (5.10)}$$

Donde:

$h_{rad} =$ se calcula con la ecuación 4.17

De la misma manera se calcula las pérdidas de calor que se tiene por las tapas del reservorio, y la sumatoria de las pérdidas laterales con las pérdidas producidas por las tapas se tiene un calor total por pérdidas.

Para el análisis de los materiales se realiza una comparación entre los siguientes aislantes:

- Espuma de poliuretano
- Fibra mineral
- Fibra de vidrio
- Corcho

Poliuretano

Conjunto de dos componentes líquidos, polioli e isocianato, que mediante reacción química entre ellos dan lugar a la espuma de poliuretano.

Componente polioli: Mezcla de polioles con grupos reactivos -OH, conteniendo catalizadores, ignífugos, expandentes y agentes estabilizadores de la espuma.

Componente isocianato: Isocianato con grupos reactivos -NCO.

La espuma rígida de poliuretano producida "in situ" puede ser empleada para el aislamiento térmico dentro de un rango de temperaturas entre (-50 a

100) °C. Durante cortos espacios de tiempo la espuma puede estar sometida a temperaturas de hasta +250 °C.

En aplicaciones donde la espuma rígida de poliuretano vaya a estar expuesta directamente a la intemperie (por ejemplo, cubiertas), se debe proteger la espuma superficialmente frente a la acción de los rayos UV con un recubrimiento adecuado.

Son numerosos los factores que influyen en el gran auge que ha alcanzado esta técnica, entre ellos cabe destacar las ventajas en la aplicación:

- Supresión total de puentes térmicos. El aislamiento no presenta juntas ni fisuras, es un aislamiento continuo, posibilidad de acceder a lugares difíciles.
- Buena adherencia al substrato. No es necesario el empleo de colas ni adhesivos para su instalación.
- Posibilidad de aislar e impermeabilizar (con densidad superior a $45 \frac{kg}{m^3}$ en cubiertas) en un único proceso. Esta característica se debe, por una parte, a su estructura de celdas cerradas y estancas al agua y, por otra, a su forma de aplicación en continuo que permite evitar las juntas.

Lana de vidrio

Un material aislante se caracteriza por el valor de su conductividad térmica; su poder aislante es más elevado cuanto más pequeña es su conductividad.

La lana de vidrio es un material compuesto. El fieltro, que se forma en la cadena, está constituido por fibras entrecruzadas desordenadamente, que impiden las corrientes de convección del aire.

Los productos fabricados son ligeros (de 10 a 110 kg/m³) y fáciles de cortar y de manejar. La lana de vidrio es incombustible, inatacable por los agentes exteriores: aire, vapor de agua, ácidos (excepto de fluorhídrico) y bases no concentradas. Se asegura a la fibra una estabilidad total, incluso en medio húmedo, y garantiza al usuario la no existencia de corrosión de los metales en contacto con ella.

Por último, la «lucha contra el ruido» ha puesto de manifiesto las cualidades «acústicas» de la lana de vidrio.

Su elevado coeficiente de absorción justifica su empleo en la corrección acústica de locales (talleres, oficinas, etc.)

La lana de vidrio puede ser empleada para el aislamiento térmico dentro de un rango de temperaturas de 4 a 510 °C.

Corcho

Se obtiene de la corteza exterior del alcornoque y por tanto es un recurso natural renovable. Los aglomerados de corcho para aislamiento están constituidos por granulado de corcho, aglutinado entre sí por la propia resina natural del corcho, mediante proceso de cocción que determina una alteración sensible al tejido suberoso.

Existen tres clases o tipos: Aglomerados expandidos puros de corcho térmicos o para aislamiento térmico, acústicos o para aislamiento acústico, sónico o fónico, y vibráticos o para aislamiento de vibraciones. El aglomerado expandido puro térmico se presenta para su uso en placas y en cilindros.

El corcho se caracteriza por su flotación, elasticidad, baja conductividad térmica y alto coeficiente de rozamiento. Es químicamente inerte y tiene un grado de impermeabilidad relativamente alto a la penetración del aire y agua. Puede aguantar una compresión fuerte verticalmente sin que se expanda horizontal ni lateralmente.

Es uno de los materiales sólidos más ligeros, su densidad específica es de 0.15 a 0.25. Comienza a calcinarse a 121.11 °C pero solo arde en contacto con la llama.

Lana de roca

Otro tipo de lana mineral es la denominada «lana de roca», elaborada a partir de rocas diabásicas (rocas basálticas), obteniéndose un producto de propiedades complementarias a la lana de vidrio. Es un producto especialmente indicado para los aislamientos térmicos en la industria (altas temperaturas).

La lana de roca se obtiene fibrando por centrifugación el material, controlando en el proceso los contenidos de sílice y de óxidos metálicos.

La lana de roca puede ser empleada para el aislamiento térmico dentro de un rango de temperaturas hasta 750 °C.

TABLA 5.6 CONDUCTIVIDA TERMICA DE ALGUNOS AISLANTES

| Aislante | Conductividad Térmica $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ |
|----------------|--|
| Poliuretano | 0,023 |
| Lana de vidrio | 0,036 |
| Corcho | 0,039 |
| Lana mineral | 0,042 |

A continuación se tiene la tabla 5.7 con los aislantes mencionados con sus respectivos espesores en función del calor que se pierde. Anexo 4

TABLA 5.7 CALOR PERDIDO EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DEL AISLANTE

| e(mm) | Materiales | | | |
|-------|-----------------------|-----------------|----------|---------------|
| | Calor perdido [W] | | | |
| | Espuma de poliuretano | Fibra de vidrio | Corcho | Fibra Mineral |
| 5 | 265,0567 | 350,8333 | 367,0064 | 382,1082 |
| 10 | 127,1426 | 183,4016 | 195,1561 | 206,5012 |
| 15 | 84,7141 | 125,6692 | 134,5208 | 143,1646 |
| 20 | 64,1271 | 96,4571 | 103,5633 | 110,5440 |
| 25 | 51,9822 | 78,8374 | 84,7999 | 90,6782 |
| 30 | 43,9803 | 67,0669 | 72,2270 | 77,3265 |
| 35 | 38,3181 | 58,6593 | 63,2273 | 67,7494 |
| 40 | 34,1068 | 52,3629 | 56,4771 | 60,5553 |
| 45 | 30,8574 | 47,4793 | 51,2353 | 54,9622 |
| 50 | 28,2786 | 43,5876 | 47,0544 | 50,4970 |
| 55 | 26,1862 | 40,4195 | 43,6483 | 46,8566 |
| 60 | 24,4579 | 37,7956 | 40,8255 | 43,8378 |
| 65 | 23,0095 | 35,5914 | 38,4530 | 41,2992 |
| 70 | 21,7808 | 33,7180 | 36,4357 | 39,1397 |
| 75 | 20,7279 | 32,1100 | 34,7035 | 37,2847 |
| 80 | 19,8181 | 30,7183 | 33,2038 | 35,6781 |
| 85 | 19,0262 | 29,5054 | 31,8963 | 34,2771 |
| 90 | 18,3327 | 28,4420 | 30,7497 | 33,0481 |
| 95 | 17,7223 | 27,5050 | 29,7391 | 31,9646 |
| 100 | 17,1826 | 26,6758 | 28,8447 | 31,0055 |
| 105 | 16,7039 | 25,9396 | 28,0503 | 30,1535 |
| 110 | 16,2780 | 25,2840 | 27,3428 | 29,3944 |

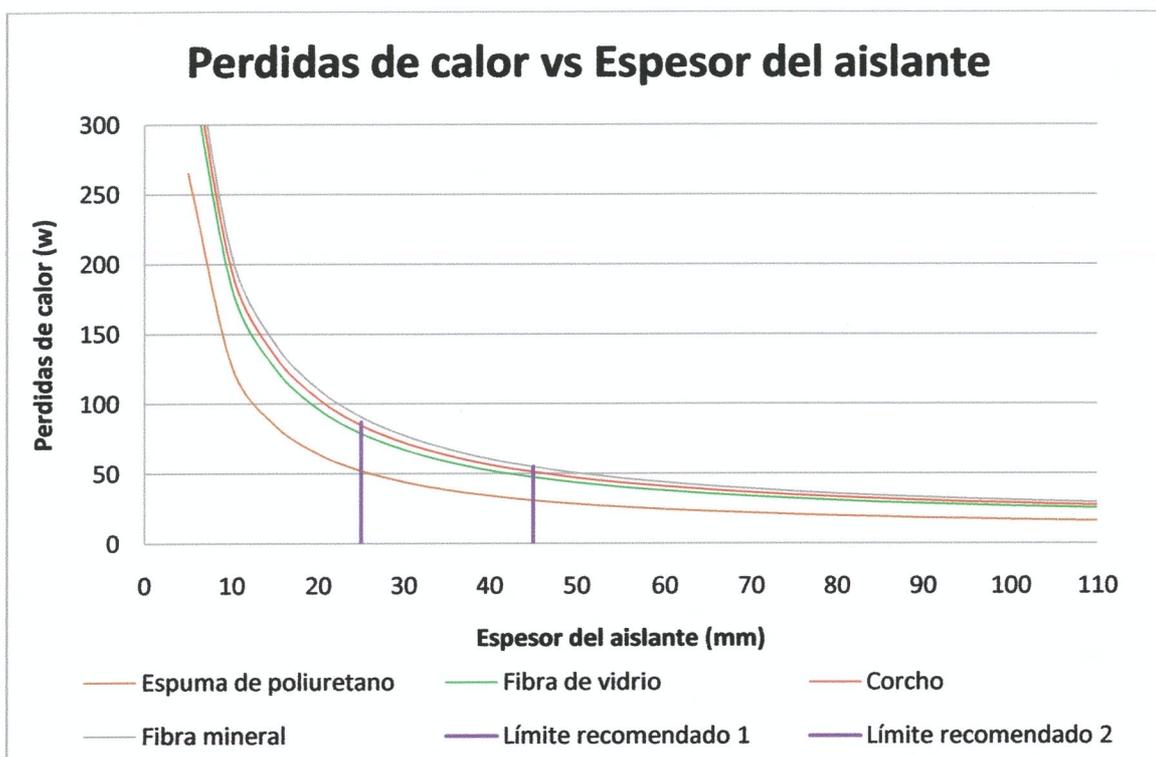


Fig. 5.27. Pérdidas de calor vs esesor del aislante

5.6.2 Análisis de las planchas reflectoras

Las planchas de aluminio del equipo, son las que reflejan la radiación solar incidente en estas placas sobre el área inferior de los tubos de borosilicato. Esta propiedad de los materiales es la denominada emisividad.

Emisividad (39)

La cantidad de energía radiada por un objeto depende de su temperatura y de su emisividad. Un objeto que emite el máximo posible de energía para su temperatura se conoce como cuerpo negro. En la práctica no hay emisores perfectos y las superficies suelen emitir menos energía que un cuerpo negro.

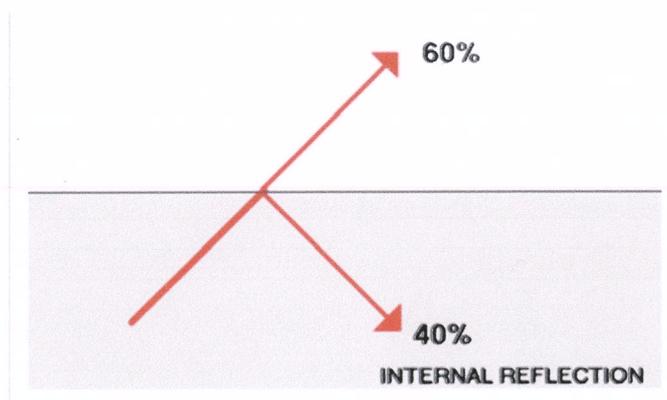


Fig. 5.28. Emisividad de los cuerpos

La figura 5.28 se muestra porque los objetos no son emisores perfectos de energía. La energía se mueve hacia la superficie pero cierta cantidad se refleja hacia el interior y nunca sale. En este ejemplo se observa que sólo se emite el 60% de la energía disponible. La emisividad de un objeto es el cociente entre la energía emitida respecto de la emitida si fuera un cuerpo negro.

A continuación realizaremos una comparación de la radiación emitida a los tubos a través de las placas y se observará la diferencia en el calor emitido.

TABLA 5.8 EMISIVIDAD DE ALGUNOS MATERIALES

| Metal | Estado de la superficie | Emisividad | Radiación reflejada — |
|-------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Aluminio | en placas | 0,85 | 270,69 |
| Cobre | negro oxidado | 0,78 | 248,40 |
| Hierro | todo oxidado | 0,69 | 219,74 |
| | | | |
| Pintura | Estado de la superficie | Emisividad | Radiación reflejada — |
| Esmalte | Blanco rugoso | 0,9 | 286,61 |
| Pintura al aceite | | 0,885 | 281,84 |
| Esmalte | Negro brillante | 0,876 | 278,97 |

Como se observa el aluminio es el metal mejor elegido ya que tiene una mejor emisividad, pero si se necesita una mayor cantidad de energía emitida se puede obtener con las pinturas esmalte o al aceite.

5.7 Estudio de costos

5.7.1 Generalidades

La energía solar es abundante pero su forma de distribución es muy amplia lo que implica que debe ser concentrada para poder ser utilizada. Resulta por tanto más costosa que otros tipos de energía como la proveniente de combustibles fósiles. La reducida demanda sería una de las razones por la cual el costo de esta tecnología ha permanecido alto por varias décadas.

Esfuerzos por bajar los precios de estos sistemas incluyen incentivos tales como reducciones en los costos de instalación o inclusive la venta de energía solar generada en exceso, como puede suceder en días soleados, a empresas eléctricas. Una vez recuperados los costos de inversión, la energía generada resultaría de muy bajo costo o hasta libre de cargo.

Desde el punto de vista ambiental, un incremento en el uso de energía solar tiene el potencial de disminuir la dependencia de combustibles fósiles,

causantes de graves problemas como el calentamiento global y la destrucción de la capa de ozono. (26)

La determinación de costos es una parte importante para lograr el éxito en cualquier negocio. Con ella podemos conocer a tiempo si el precio al que vendemos lo que producimos nos permite lograr la obtención de beneficios, luego de cubrir todos los costos de funcionamiento de la empresa.

Los costos nos interesan cuando están relacionados directamente con la productividad de la empresa. Es decir, nos interesa particularmente el análisis de las relaciones entre los costos, los volúmenes de producción y las utilidades. (29)

5.7.2 Costos directos

Se define como los costos que pueden identificarse con productos específicos. También se usa la denominación para indicar costos identificables con departamentos u otras entidades específicas. En lo que se refiere a la construcción se entenderán todos los costos que están asociados directamente con la obra. Corresponden a materiales, mano de obra, equipos y maquinarias comprometidas directamente con la ejecución. (29)

Los costos para la construcción del colector solar están detallados a continuación:

TABLA 5.9: COSTOS DE MATERIALES

| Denominación | Unid. | Cantidad | Precio U.(\$) | Subtotal (\$) |
|------------------------------|----------|----------|-------------------|---------------|
| Acero galvanizado | Planchas | 1,2 | 31 | 37,2 |
| Poliuretano | kg | 3,2 | 4,2 | 13,44 |
| Tubos al vacío | u | 18 | 10 | 180 |
| Soportes curvo | u | 2 | 3,5 | 7 |
| Soporte de tubos | u | 1 | 10 | 10 |
| Empaques superiores externos | u | 18 | 0,5 | 9 |
| Empaques inferiores externos | u | 18 | 0,5 | 9 |
| Empaques internos | u | 22 | 0,75 | 16,5 |
| Perfileria | m | 11 | 2,5 | 27,5 |
| Planchas de aluminio | u | 18 | 1 | 18 |
| Reservorio de agua fría | u | 1 | 5 | 5 |
| Codos | u | 10 | 0,36 | 3,6 |
| Manguera | m | 25 | 0,26 | 6,5 |
| Pernos | u | 20 | 0,25 | 5 |
| | | | Subtotal 1 | 347,74 |

TABLA 5.10: COSTOS MANO DE OBRA

| Cant. | Operador | Horas - Hombre | Costo/hora | Subtotal (\$) |
|-------|-----------|----------------|-------------------|---------------|
| 1 | Soldador | 6 | 3,75 | 22,5 |
| 1 | Gasfitero | 5 | 2 | 10 |
| 1 | Operario | 6 | 1,8 | 10,8 |
| | | | Subtotal 2 | 43,3 |

TABLA 5.11: COSTOS MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS

| Cant. | Denominación | Horas - Equipo | Costo/hora | Subtotal (\$) |
|-------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| 1 | Dobladora | 1 | 1 | 1 |
| 1 | Amoladora | 1 | 2 | 2 |
| 1 | Soldadora de punto | 5 | 5 | 25 |
| 1 | Compresor | 1 | 2 | 2 |
| 1 | Taladro | 1 | 1 | 1 |
| | Herramienta manual | 5 | 1 | 5 |
| | | | Subtotal 3 | 36 |

TABLA 5.12: COSTOS DE TRANSPORTE

| N° | Denominación | Cantidad | Costo Unit.(\$) | Subtotal (\$) |
|----|---------------|----------|--------------------|---------------|
| 1 | Movilización. | 2 | 6 | 6 |
| | | | Subtotal 4 | 6 |

El costo total directo para la construcción del equipo solar es de:

TABLA 5.13: COSTO TOTAL DIRECTO

| | |
|--------------|---------------|
| Subtotal 1 | 347,74 |
| Subtotal 2 | 43,3 |
| Subtotal 3 | 36 |
| Subtotal 4 | 6 |
| TOTAL | 433,04 |



5.7.3 Costos indirectos

Son aquellos que no pueden asignarse con precisión contextos, con cualquier unidad o proyecto específico de la organización, a su vez pueden clasificarse como:

1. Específico: Son los que ocurren solo en función de la obra. Si ésta no se realiza los costos indirectos específicos no existirían.

2. General: Aquellos que son relativamente independientes de la obra. los que no tienen relación atribuible a un producto o identificable con él o en algunos. (27)

TABLA: 5.14 COSTO INGENIERIL

| N° | Denominación | Cantidad | Costo Uni.(\$) | Subtotal (\$) |
|-----------|------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|
| 1 | Dirección técnica | 1 | 43,304 | 43,304 |
| 1 | Documentación y planos | 1 | 8,66 | 8,66 |
| 1 | Imprevistos | 1 | 13 | 13 |
| | | | Subtotal 1 | 64,96 |

Utilidad.- Se considera el 0% del costo directo total porque es un equipo tipo para la tesis presentada.

Imprevistos.- Se considera un 3% del costo directo total.

El costo total indirecto para la ejecución del equipo solar es de:

TABLA 5.15: COSTO TOTAL INDIRECTO

| | |
|--------------|--------------|
| Subtotal 1 | 64,96 |
| Subtotal 2 | 0 |
| TOTAL | 64,96 |

5.7.4 Costos totales del proyecto

Los costos totales incurridos en la operación de una empresa durante un periodo dado, se cuantifican sumando sus costos fijos y variables, expresándose esta relación según se indica a continuación: (29)

$$\text{COSTOS TOTALES} = \text{COSTOS FIJOS} + \text{COSTOS VARIABLES}$$

Para determinar la posible rentabilidad de vender un determinado producto el punto de equilibrio es muy usado.

El costo total para la ejecución del equipo solar es de:

\$ 498

5.8 Valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR)

El valor actual neto es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

La regla de decisión es $VAN > 0$ implica proyecto rentable, $VAN < 0$ proyecto no rentable, y cuanto mayor es el VAN más rentable es el proyecto. El VAN mide la rentabilidad en términos monetarios.

La Tasa Interna de Rentabilidad es la tasa de interés tal que para un proyecto de inversión determinado hace su VAN sea nulo. La regla de decisión es aceptar como rentables los proyectos con $TIR > i$ siendo i la tasa de interés previamente definida.

El periodo de retorno es el tiempo que tarda en conseguirse que la suma de movimientos de fondos actualizados sea nula.

Dentro de las especificaciones técnicas del equipo, este tiene una larga vida útil, pero para un análisis económico se utilizará una vida estimada de 20 años. El equipo fue adquirido en \$ 500.

Según la ecuación 3.2 el consumo anual por vivienda es de 160.6 \$ por año para cuatro personas. Este valor representa un ingreso en caso de que el equipo ya haya sido adquirido, el mismo que se lo conoce como valor actual de ingresos (VAI), por lo tanto el costo de adquisición es el valor actual de egresos (VAE). (9)

Valores que restados nos dan como resultado el valor actual de ingresos expresado de la siguiente forma:

$$VAN = VAI - VAE \quad (5.11)$$

$$VAI = P * \frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n} \quad (5.12)$$

$$VAE = 500 \quad (5.13)$$

TABLA 5.16: COSTOS DE INVERSIÓN, INGRESOS Y EGRESOS DEL PROYECTO

| Detalle | \$ (mensual) |
|------------------|---------------------|
| Ingreso | 13,38 |
| Egreso | 0,00 |
| Inversión | 500,00 |

TABLA 5.17: ANALISIS DEL VAN

| n (meses) | i (%) | VAI | VAE | VAN |
|-----------|-------|---------|--------|--------|
| 240 | 0,75 | 1487,49 | 500,00 | 987,49 |
| 240 | 1 | 1215,47 | 500,00 | 715,47 |
| 240 | 1,25 | 1016,36 | 500,00 | 516,36 |
| 240 | 1,5 | 867,18 | 500,00 | 367,18 |
| 240 | 1,75 | 752,87 | 500,00 | 252,87 |
| 240 | 2 | 663,39 | 500,00 | 163,39 |
| 240 | 2,25 | 591,96 | 500,00 | 91,96 |
| 240 | 2,5 | 533,90 | 500,00 | 33,90 |
| 240 | 2,75 | 485,94 | 500,00 | -14,06 |

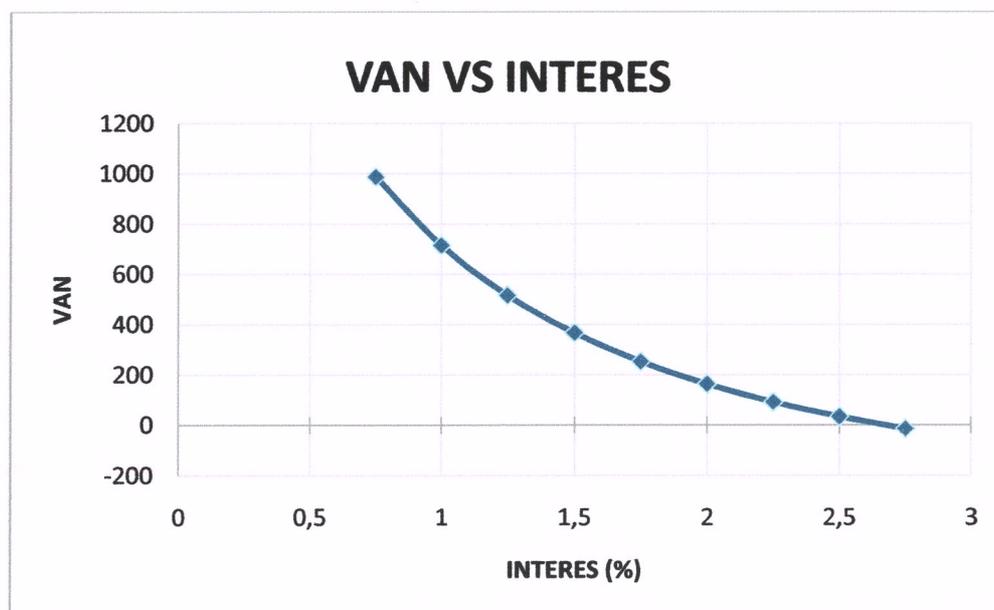


Fig. 5.29. VAN – Interés %

El valor actual neto mensual en nuestro caso se encuentra entre el 2,5% y 2,75%, en estos valores procedemos a realizar el cálculo del TIR con la formula:

$$\text{TIR} = \% + \Delta\% \left(\frac{\text{VAN}^+}{\text{VAN}^+ + \text{VAN}^-} \right) \quad (5.14)$$

Con la formula anterior se tiene en una tasa interna de retorno de 2,68% mensual, lo mismo que nos lleva a tener un 32,12% TIR anual.

5.9 Rentabilidad del proyecto

A continuación se procede a efectuar el análisis de la rentabilidad del proyecto de inversión de implantación del equipo colector solar que es capaz de calentar agua para uso doméstico.

Se entiende como rentable aquella inversión en la que el valor de los rendimientos que proporciona es superior al de los recursos que utiliza. Para determinar la rentabilidad de una inversión, o para decidir entre varias inversiones alternativas en términos de rentabilidad, se emplean indicadores de rentabilidad tales como el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Rentabilidad o el periodo de retorno.

5.9.1 Análisis del punto de equilibrio

Es el punto en donde los ingresos totales recibidos se igualan a los costos asociados con la venta de un producto. Un punto de equilibrio es usado comúnmente en las empresas u organizaciones para determinar la posible rentabilidad de un producto. Para calcular el punto de equilibrio es necesario tener bien identificado el comportamiento de los costos; de otra manera es sumamente difícil determinar la ubicación de este punto.

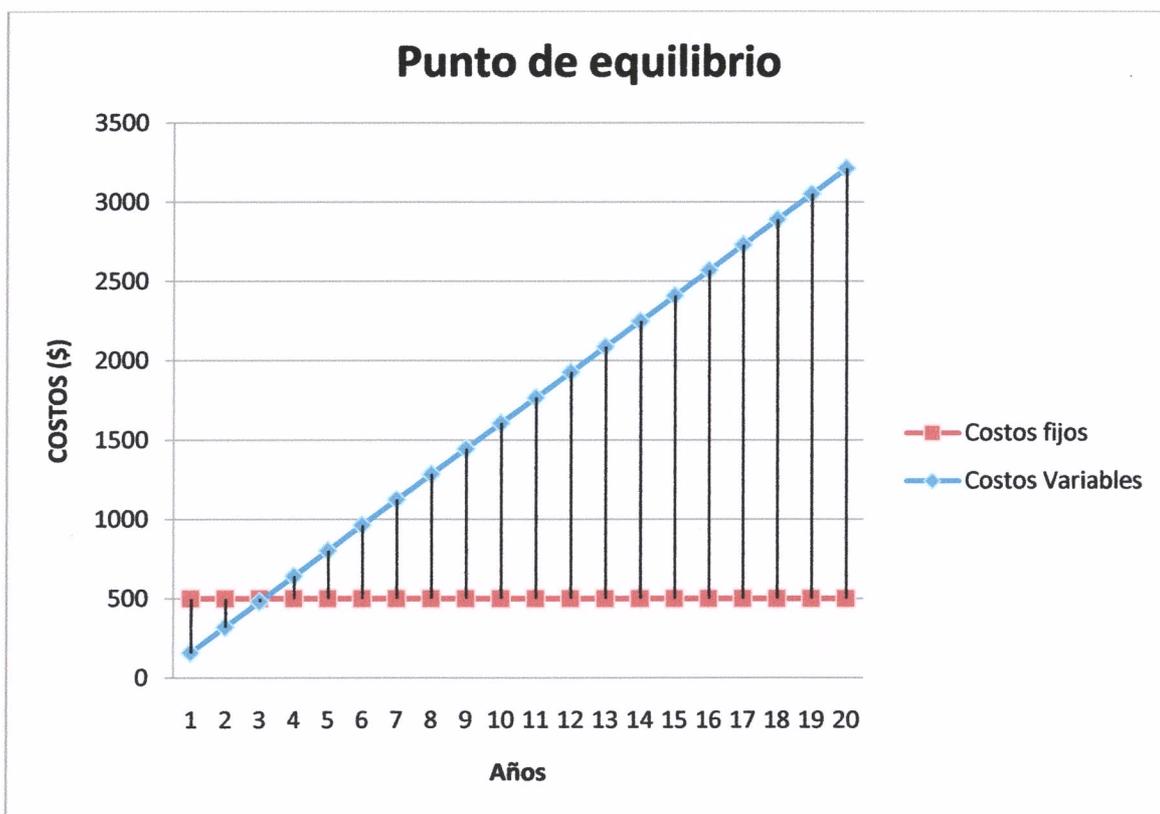


Fig. 5.30. Análisis del punto de equilibrio

Como se observa en la gráfica, la inversión inicial en la adquisición del equipo se recupera en aproximadamente tres años, lo que nos indica que el proyecto es rentable ya que a partir de este, solo se obtendrá ganancias.

CAPÍTULO VI

6.1 Conclusiones

- Las fuentes alternas de energía representan potenciales energéticos abundantes, no perecibles, descentralizantes, gratuitos y ecológicamente limpios, por ello la necesidad de incursionar en el estudio de equipos de captación de fuentes alternas de energía, particularmente de las provenientes del sol.
- Los colectores de tubos al vacío resultan óptimos para el aprovechamiento de la energía solar a pesar de las fluctuaciones de la misma, se tiene un buen rendimiento en días soleados claros y nublados.
- Se debe tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas, la radiación solar es menor en invierno, precisamente cuando más se suele necesitar.
- Sería poco racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles la energía solar, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

- La circulación del agua se produce de forma natural sin necesidad de incorporar una bomba de recirculación, debido a la diferencia de densidad entre distintos puntos del fluido al encontrarse a distinta temperatura.
- De la modelación matemática se concluye que el sistema tiene una eficiencia del 71% para una temperatura de salida del fluido de 40 °C, considerada alta, por las prestaciones de los tubos al vacío, además calculado en función de consideraciones geométricas, térmicas e hidráulicas del sistema.
- La estandarización de los sistemas de calentamiento de agua con energía solar se basó en la modelación matemática que permite relacionar las siguientes variables: área del colector solar o números de tubos en función de la radiación solar incidente y número de personas.
- La tabla de estandarización de sistemas solares para calentamiento de agua es amplia, desde una persona incluso para satisfacer las necesidades del sector hotelero (200 personas), es decir que incluye a una amplia gama de usos.
- La estandarización permite la selección de equipos, en sitios donde la radiación este dentro del rango de 400 a 1000 W/m² es decir en todos los lugares del Ecuador.

- La radiación solar en Riobamba es considerable, pues llega como promedio alrededor de 688 W/m^2 , lo que permite la utilización adecuada de energía solar, ya que de promedio en la Ciudad se tendría sobre los $5 \frac{\text{Kw}}{\text{m}^2} * d\lambda a$, valor superior a los $3 \frac{\text{Kw}}{\text{m}^2} * d\lambda a$, que son requeridos para que un sistema de calentamiento de agua sea rentable, con ello se debe decir que para lugares en donde exista una radiación promedio de $200 \frac{\text{w}}{\text{m}^2}$ no es recomendable este sistema.
- El equipo típico estandarizado para la Ciudad de Riobamba es de 2 m^2 de área de colector del tipo placa plana, con el sistema de tubos concéntricos se necesita $1,44 \text{ m}^2$ para satisfacer las mismas necesidades, ofreciendo ventajas en la utilización del espacio disponible.
- El calentamiento de agua para uso domestico e industrial en Ecuador y en Riobamba se centraliza en la utilización de electricidad del S.N.I. o en la quema de GLP principalmente lo que ocasiona un costo energético alto, pues para una familia media de Riobamba (5 personas) implica un pago de electricidad que bordea los 16,5 dólares mensuales.
- El costo del equipo estandarizado es de US \$500 instalado, el mismo que es fácilmente amortizable en un lapso de 3 años, sabiendo que la vida útil del equipo es de 20 años y alcanzando un TIR del 32,12 anual.

- Analizando los materiales del aislante se concluye que la espuma de poliuretano es la más adecuada para esta aplicación ya que brinda el mejor aislamiento en las condiciones de trabajo del equipo.
- El material utilizado para la construcción del reservorio debería ser de acero inoxidable pero por su alto costo en comparación con el acero galvanizado minimiza su uso.
- Analizando los materiales de las placas reflectoras se concluye que las placas de aluminio anodizado son las que nos brindan la más alta emisividad, emitiendo una radiación de $270,69 \frac{W}{m^2}$, el mismo que se puede mejorar con pintura esmalte blanco rugoso el mismo que emite una radiación de $286,61 \frac{W}{m^2}$.
- Se debe mantener siempre conectado el sistema a la red doméstica de agua de la vivienda para garantizar el flujo continuo de agua caliente y evitar que este sea intermitente.
- En Riobamba al existir de promedio 4.9 horas de sol brillante al día garantiza el funcionamiento del sistema estandarizado sea continuo todos los días del año.

6.2 Recomendaciones

- Normalmente la simple lluvia puede mantener limpios los tubos. Lamentablemente la combinación de lluvia, polvo, smog y ceniza puede ocasionar cierta pañosidad en los tubos. Recomendamos que al menos cada 6 meses se aplique una solución jabonosa con un trapo suave (franela) para eliminar la opacidad generada por la suciedad del ambiente.
- Si un tubo al vacío de su sistema se rompe, se recomienda que se selle la válvula de entrada para evitar que el agua se desperdicie. Contacte con su proveedor de servicio y reemplácelo lo antes posible.
- Se debe ser muy cuidadoso cuando maneje los tubos al vacío. El riesgo consiste en que por descuido, usted golpee el tubo contra un objeto macizo que ocasione una fractura al tubo el cual le puede causar una lesión.
- Durante el proceso de instalación es muy factible que el sol este brillando. Mantenga los tubos en su caja cerrada durante todo el proceso de instalación, ya que una vez expuestos al sol, los tubos se pueden calentar fuertemente y alcanzar temperaturas internas de hasta 200° C. A esta temperatura fácilmente se pueden ocasionar quemaduras al instalador.

- Además es muy importante observar que si durante el proceso de instalación, antes de conectar el agua al sistema los tubos han estado expuestos a la radiación, no se deberá abrir el paso del agua, sino hasta que la radiación haya vuelto a disminuir. Los tubos al vacío van a estar muy calientes en su interior y al entrar en contacto con el agua de golpe, se generará un choque térmico lo que puede resultar en que uno o más tubos se fracturen.
- La tubería de salida del sistema que lleva el agua caliente hacia las zonas de consumo en su casa, se recomienda que estas tuberías estén lo mejor aisladas posibles para evitar pérdidas de calor con el medio ambiente y maximizar al ahorro de energía. Sugerimos verificar este aislamiento al menos cada 6 meses.
- Se sugiere que siempre utilice guantes de seguridad cuando maneje las partes metálicas del sistema.
- Se recomienda la instalación del sistema solar en lugares donde no haya sombras sobre el panel (techos, terrazas de las casas) el mismo que debe tener una inclinación de 11° con respecto a la horizontal y orientándole hacia la línea ecuatorial es decir hacia el hemisferio norte para garantizar una mejor absorción de la radiación solar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **MONTGOMERY, Richard.** Energía solar: Selección de equipo, instalación y aprovechamiento. México: Limuza, 2005. pp. 78 -81
- [2] **JUTGLAR Lluís.** Energía solar: Energías Alternativas y medio ambiente España: Ceac.2004. pp. 35 - 42
- [3] **MEINEL Aden B.** Aplicaciones de la energía solar. Barcelona: Reverté, 1982. pp. 64 - 100
- [4] **SANTILLÁN, Rodolfo.** Tecnología y Medio Ambiente. Texto básico. Riobamba: Facultad de Mecánica. ESPOCH, 2005. pp. 15 - 25
- [5] **YUNUS A Cengel.** Transferencia de calor y masa. 3da.ed. Mexico: Mc Grawhill, 2007. pp. 688 - 699
- [6] **WOLFGANG Palz.** Energía solar: Estudio económico de la energía solar. Barcelona: Blume, 2002. pp. 10 - 30
- [7] **MANRIQUE, José A G.** Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Foto térmicas. México: Harla S.A., 2000, pp. 125 - 131
- [8] **SANTILLÁN, Rodolfo.** Fuentes Alternas de Energía, Energía Solar. Riobamba - Ecuador: ESPOCH, 2000. pp. 13 - 48
- [9] **JIMENEZ, Santiago.** Estandarización de Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía Solar en la Ciudad de Riobamba. Riobamba - Ecuador: ESPOCH, 2009. pp. 30 - 60
- [43] **ASHRAE.** Manual de Climatización. USA: 2000. pp. 201- 210

- [44] **PAZMIÑO, Marco**, Uso de la radiación solar. Guayaquil – Ecuador:
ESPOL 1982. pp. 31 - 44

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAE. Manual de Climatización. USA: 2000

JIMENEZ, Santiago. Estandarización de Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía Solar en la Ciudad de Riobamba. Riobamba - Ecuador: ESPOCH, 2009

JUTGLAR Lluís. Energía solar: Energías Alternativas y medio ambiente España: Ceac.2004

MANRIQUE, José A G. Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Foto térmicas. México: Harla S.A., 2000,

MEINEL Aden B. Aplicaciones de la energía solar. Barcelona: Reverté, 1982

MONTGOMERY, Richard. Energía solar: Selección de equipo, instalación y aprovechamiento. México: Limuza, 2005

PAZMIÑO, Marco, Uso de la radiación solar. Guayaquil – Ecuador: ESPOL 1982.

SANTILLÁN, Rodolfo. Tecnología y Medio Ambiente. Texto básico. Riobamba: Facultad de Mecánica. ESPOCH, 2005

SANTILLÁN, Rodolfo. Fuentes Alternas de Energía, Energía Solar. Riobamba - Ecuador: ESPOCH, 2000

WOLFGANG Palz. Energía solar: Estudio económico de la energía solar. Barcelona: Blume, 2002

YUNUS A Cengel. Transferencia de calor y masa. 3da.ed. Mexico: Mc
Grawhill, 2007

LINKOGRAFÍA

- [10] Norma Mexicana.

<http://www.sitiosolar.com/NMX-ES-001-NORMEX20-202005.pdf>

2009-11-10

- [11] Colectores solares de tubos al vacío

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia39/HTML/articulo02.htm>

2009-11-10

- [12] Colector solar de tubos de vacío nuevos materiales

<http://numaco.blogspot.com/2008/05/colector-de-tubo-de-vaco.html>

2009-11-10

- [13] Tubos de vacío

http://www.amordad.es/tubos_de_vacio.asp

2009-11-13

- [14] Colector solar térmico de tubo de vacío y tecnología Heat – Pipe

http://www.juliomartineznaya.com/es/productos/colectores_solares_tubos_de_vacio_heat_pipe.pdf

2009-11-13

[15] El sol

<http://es.wikipedia.org/wiki/Sol>

2009-11-13

[16] Sol

<http://www.solarviews.com/span/sun.htm>

2009-11-13

[17] La energía solar

<http://www.censolar.es/menu2.htm>

2009-11-14

[18] Guía de energía solar

<http://www.bun-ca.org/publicaciones/SOLAR.pdf>

2009-11-14

[19] Solar Térmica

<http://www.biotechenergia.com/termica.pdf>

2009-11-15

[20] Calentador de agua

http://es.wikipedia.org/wiki/Calentador_de_agua

2009-11-15

- [21] Situación de la energía en el mundo

<http://www.energiasrenovables.ciemat.es/especiales/energia/index.htm>

2009-12-11

- [22] Situación de la energía en Ecuador

<http://www.conelec.gov.ec/calculokw.php?menu=41&submenu1=42&idiom=1>

2009-12-12

- [23] Ecuador. La energía eléctrica

<http://www.cideiber.com/infopaises/Ecuador/Ecuador-05-03.html>

2009-12-13

- [24] Colectores solares de tubos concéntricos. 24

<http://www.amordad.es/>

2009-12-16

- [25] Atlas solar del Ecuador

<http://www.conelec.gov.ec/downloads/Atlas.pdf>

2009-12-18

[26] Costo de la energía solar

http://www.gstriatum.com/energiasolar/articulosenergia/40_costo_energiasolar.html

2010-01-07

[27] Costos

<http://www.xuletas.es/ficha/costo-directo-e-indirecto-escalacion-y-proceso-de-control-de-un-proyecto/>

2010-03-27

[28] Colectores solares de tubos concéntricos

www.solarinnova.net

2010-02-10

[29] Costos

<http://www.members.tripod.com/aromaticas/Costos.htm>

2010-04-29

[30] Energía Solar

<http://www.unionsolarenergias.com/2.html>

2010-05-02



[31] Tubos de alto vacío

http://www.loxtonsolyleds.com/pdf/cat_tubos.pdf

2010-05-12

[32] Energía solar no contamina

<http://www.amordad.cl/ambiente.html>

2010-05-05

[33] Energía solar. Que es y cómo usarla?

<http://www.gstriatum.com/energiasolar/>

2010-05-05

[34] Manual de instalación de un colector solar

www.solarinnova.net

2010-05-06

[35] Factor óptico

http://www.sunnyday.it/manuali/manuale_spa.pdf

2010-06-06

[36] Tubos al vacío

http://www.siesol-calentador-solar.com.mx/Como_Funcionan_Los_Tubos_Evacuados.htm

2010-06-10

[37] Borosilicato

http://es.wikipedia.org/wiki/Silicato_de_boro

2010-05-26

[38] Estación meteorológica

http://www.davisnet.com/weather/products/wx_product_docs.asp?pnum=0

6450

2010-05-20

[39] Emisividad de sólidos

[http://www.landinst.es/infrarroja/descarga_de_ficheros/pdf/Termografia_G](http://www.landinst.es/infrarroja/descarga_de_ficheros/pdf/Termografia_Guia_Basica.pdf)

[uia_Basica.pdf](http://www.landinst.es/infrarroja/descarga_de_ficheros/pdf/Termografia_Guia_Basica.pdf)

[40] Factor óptico

<http://www.termica.cursodeformaciongratis.com/el-colector-solar.html>

2010-06-06

[41] Factor óptico

<https://www.u->

[cursos.cl/ingenieria/2008/2/ME716/1/material_docente/objeto/201903](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/ME716/1/material_docente/objeto/201903)

2010-06-06

[42] Energía interna

http://es.wikipedia.org/wiki/EnergC3ADa_interna

2010-06-11

[45] Factor óptico

ecoefecto.com/CSA20Intro.htm

ANEXOS

ANEXO 1

| | |
|--|------------------------------------|
| Material del vidrio | Alta calidad vidrio de borsilicato |
| Diámetro de los tubos | 47 mm |
| Espesor del vacío | 5 mm |
| Espesor del vidrio | 2 mm |
| Peso por tubo | 1.5 kg |
| Alto vacío-estabilidad a largo termino | 5×10^{-3} Pa |
| Material absorbente | Aluminio |
| Acabado | Aluminio Nitrado |
| Coefficiente de absorción | $\alpha \geq 0.94$ |
| Resistencia contra viento | 30 m/s |
| Toleracion de congelación | -30° C |
| Resistencia de granizo | 25 mm granizo |
| Temperatura de insolación | 250° C |
| Temperatura de empiezo | $\leq 25^{\circ}\text{C}$ |
| Longitud del tubo | 1.50 mts. Y 1.80 mts. |
| Capacidad de agua por tubo | 1.5 lts y 1.80 lts |

Fuente:

<http://www.solucionesdeenergia.com.mx/CALENTADORES%20SOLARES%20PARA%20AGUA%20PSB.pdf>

ANEXO 2

TABLA 12-3

Comparación de la absorptividad solar α_s de algunas superficies con su emisividad ϵ a la temperatura ambiente

| Superficie | α_s | ϵ |
|-------------------------|------------|------------|
| Aluminio | | |
| Pulido | 0.09 | 0.03 |
| Anodizado | 0.14 | 0.84 |
| Hoja | 0.15 | 0.05 |
| Cobre | | |
| Pulido | 0.18 | 0.03 |
| Deslustrado | 0.65 | 0.75 |
| Acero inoxidable | | |
| Pulido | 0.37 | 0.60 |
| Opaco | 0.50 | 0.21 |
| Metales plateados | | |
| Óxido negro de níquel | 0.92 | 0.08 |
| Cromo negro | 0.87 | 0.09 |
| Concreto | 0.60 | 0.88 |
| Mármol blanco | 0.46 | 0.95 |
| Ladrillo rojo | 0.63 | 0.93 |
| Asfalto | 0.90 | 0.90 |
| Pintura negra | 0.97 | 0.97 |
| Pintura blanca | 0.14 | 0.93 |
| Nieve | 0.28 | 0.97 |
| Piel humana (caucásica) | 0.62 | 0.97 |

Fuente: YUNUS A Cengel.- Transferencia de calor y masa.-Editorial Mc Grawhill,

ANEXO 3

Datos físicos

| | |
|--|---|
| Coefficiente medio de dilatación lineal térmica α (20 °C;300 °C) según ISO 7991 | $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| Temperatura de transformación T_g | 525 °C |
| Temperaturas del vidrio para las viscosidades η en dPa · s: | |
| 10^{13} temperatura de enfriamiento superior | 560 °C |
| $10^{7,6}$ temperatura de reblandecimiento | 825 °C |
| 10^4 temperatura de trabajo | 1260 °C |
| Temperatura máxima admisible para uso de corta duración | 500 °C |
| Densidad ρ a 25 °C | $2,23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ |
| Módulo de elasticidad E (Young's modulus) | $64 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ |
| Índice de Poisson μ | 0,20 |
| Conductividad térmica λ_w a 90 °C | $1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| Temp. para la resistencia eléctrica específica de $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ (DIN 52 326) $t_{k,100}$ | 250 °C |
| Logaritmo de la resistencia eléctrica volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$) | |
| a 250 °C | 8 |
| a 350 °C | 6,5 |
| Propiedades dieléctricas (1 MHz, 25 °C) | |
| Constante dieléctrica ϵ | 4,6 |
| Factor de pérdida dieléctrica $\tan \delta$ | $37 \cdot 10^{-4}$ |
| Índice de refracción ($\lambda = 587,6 \text{ nm}$) n_d | 1,473 |
| Coefficiente de tensión óptica (DIN 52 314) | $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ |

Fuente: http://www.vidrasa.com/esp/catalog/vidrasa_duran.pdf

ANEXO 4

| TABLA A-6 | | | | | |
|---|--|---------------------------------------|---|--|---|
| Propiedades de materiales aislantes (a una temperatura media de 24°C) | | | | | |
| Material | Espesor, L mm | Densidad, ρ kg/m ³ | Conductividad térmica, k W/m · K | Calor específico, c_p kJ/kg · K | Valor R (para los espesores de la lista, L/k), K · m ² /W |
| Colcha y lámina | | | | | |
| Fibra mineral (forma fibrosa procesada a partir de roca, escoria o vidrio) | 50 a 70 mm 75 a 90 mm 135 a 165 mm | 4.8-32 4.8-32 4.8-32 | — — — | 0.71-0.96 0.71-0.96 0.71-0.96 | 1.23 1.94 3.32 |
| Tablero y losa | | | | | |
| Vidrio celular | | 136 | 0.055 | 1.0 | — |
| Fibra de vidrio (ligamento orgánico) | | 64-144 | 0.036 | 0.96 | — |
| Poliestireno expandido (bolitas moldeadas) | | 16 | 0.040 | 1.2 | — |
| Poliuretano expandido (R-11 expandido) | | 24 | 0.023 | 1.6 | — |
| Perlita expandida (ligamento orgánico) | | 16 | 0.052 | 1.26 | — |
| Caucho expandido (rígido) | | 72 | 0.032 | 1.68 | — |
| Fibra mineral con aglomerante de resina | | 240 | 0.042 | 0.71 | — |
| Corcho | | 120 | 0.039 | 1.80 | — |
| Rociado o formado en el sitio | | | | | |
| Espuma de poliuretano | | 24-40 | 0.023-0.026 | — | — |
| Fibra de vidrio | | 56-72 | 0.038-0.039 | — | — |
| Uretano, mezcla de dos partes (espuma rígida) | | 70 | 0.026 | 1.045 | — |
| Gránulos de lana mineral con aglomerantes de asbesto/inorgánico (rociado) | | 190 | 0.046 | — | — |
| Relleno flojo | | | | | |
| Fibra mineral (de roca, escoria o vidrio) | ~ 75 a 125 mm ~165 a 222 mm ~191 a 254 mm ~185 mm | 9.6-32 9.6-32 — — | — — — — | 0.71 0.71 0.71 0.71 | 1.94 3.35 3.87 5.28 |
| Aerogel de sílice | | 122 | 0.025 | — | — |
| Vermiculita (expandida) | | 122 | 0.068 | — | — |
| Perlita (expandida) | | 32-66 | 0.039-0.045 | 1.09 | — |
| Aserrín o virutas | | 128-240 | 0.065 | 1.38 | — |
| Aislamiento celulósico (papel molido o pulpa de madera) | | | | | |
| | | 37-51 | 0.039-0.046 | — | — |
| Aislamiento para techo | | | | | |
| Vidrio celular | — | 144 | 0.058 | 1.0 | — |
| Preformado, para usarse arriba del tablero | 13 mm 25 mm 50 mm | — — — | — — — | 1.0 2.1 3.9 | 0.24 0.49 0.93 |
| Aislamiento reflector | | | | | |
| Polvo sílice (al vacío) | | 160 | 0.0017 | — | — |
| Hoja de aluminio separando colchones de vidrio esponjoso, 10 a 12 capas (al vacío); para aplicaciones criogénicas (150 K) | | 40 | 0.00016 | — | — |
| Hoja de aluminio y laminado de vidrio y papel; 75 a 150 capas; para aplicaciones criogénicas (150 K) | | 120 | 0.000017 | — | — |

Fuente: YUNUS A Cengel.- Transferencia de calor y masa.-Editorial Mc Grawhill,

ANEXO 5

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

| Temp., T °C | Presión de saturación, P _{sat} , kPa | Densidad, ρ kg/m ³ | | Entalpía de vaporización, h _{fg} , kJ/kg | Calor específico, c _p , J/kg · K | | Conductividad térmica, k W/m · K | | Viscosidad dinámica, μ kg/m · s | | Número de Prandtl, Pr | | Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K |
|----------------|--|----------------------------------|--------|--|--|--------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|--|
| | | Líquido | Vapor | | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | |
| 0.01 | 0.6113 | 999.8 | 0.0048 | 2 501 | 4 217 | 1 854 | 0.561 | 0.0171 | 1.792 × 10 ⁻³ | 0.922 × 10 ⁻⁵ | 13.5 | 1.00 | -0.068 × 10 ⁻³ |
| 5 | 0.8721 | 999.9 | 0.0068 | 2 490 | 4 205 | 1 857 | 0.571 | 0.0173 | 1.519 × 10 ⁻³ | 0.934 × 10 ⁻⁵ | 11.2 | 1.00 | 0.015 × 10 ⁻³ |
| 10 | 1.2276 | 999.7 | 0.0094 | 2 478 | 4 194 | 1 862 | 0.580 | 0.0176 | 1.307 × 10 ⁻³ | 0.946 × 10 ⁻⁵ | 9.45 | 1.00 | 0.733 × 10 ⁻³ |
| 15 | 1.7051 | 999.1 | 0.0128 | 2 466 | 4 186 | 1 863 | 0.589 | 0.0179 | 1.138 × 10 ⁻³ | 0.959 × 10 ⁻⁵ | 8.09 | 1.00 | 0.138 × 10 ⁻³ |
| 20 | 2.339 | 998.0 | 0.0173 | 2 454 | 4 182 | 1 867 | 0.598 | 0.0182 | 1.002 × 10 ⁻³ | 0.973 × 10 ⁻⁵ | 7.01 | 1.00 | 0.195 × 10 ⁻³ |
| 25 | 3.169 | 997.0 | 0.0231 | 2 442 | 4 180 | 1 870 | 0.607 | 0.0186 | 0.891 × 10 ⁻³ | 0.987 × 10 ⁻⁵ | 6.14 | 1.00 | 0.247 × 10 ⁻³ |
| 30 | 4.246 | 996.0 | 0.0304 | 2 431 | 4 178 | 1 875 | 0.615 | 0.0189 | 0.798 × 10 ⁻³ | 1.001 × 10 ⁻⁵ | 5.42 | 1.00 | 0.294 × 10 ⁻³ |
| 35 | 5.628 | 994.0 | 0.0397 | 2 419 | 4 178 | 1 880 | 0.623 | 0.0192 | 0.720 × 10 ⁻³ | 1.016 × 10 ⁻⁵ | 4.83 | 1.00 | 0.337 × 10 ⁻³ |
| 40 | 7.384 | 992.1 | 0.0512 | 2 407 | 4 179 | 1 885 | 0.631 | 0.0196 | 0.653 × 10 ⁻³ | 1.031 × 10 ⁻⁵ | 4.32 | 1.00 | 0.377 × 10 ⁻³ |
| 45 | 9.593 | 990.1 | 0.0655 | 2 395 | 4 180 | 1 892 | 0.637 | 0.0200 | 0.596 × 10 ⁻³ | 1.046 × 10 ⁻⁵ | 3.91 | 1.00 | 0.415 × 10 ⁻³ |
| 50 | 12.35 | 988.1 | 0.0831 | 2 383 | 4 181 | 1 900 | 0.644 | 0.0204 | 0.547 × 10 ⁻³ | 1.062 × 10 ⁻⁵ | 3.55 | 1.00 | 0.451 × 10 ⁻³ |
| 55 | 15.76 | 985.2 | 0.1045 | 2 371 | 4 183 | 1 908 | 0.649 | 0.0208 | 0.504 × 10 ⁻³ | 1.077 × 10 ⁻⁵ | 3.25 | 1.00 | 0.484 × 10 ⁻³ |
| 60 | 19.94 | 983.3 | 0.1304 | 2 359 | 4 185 | 1 916 | 0.654 | 0.0212 | 0.467 × 10 ⁻³ | 1.093 × 10 ⁻⁵ | 2.99 | 1.00 | 0.517 × 10 ⁻³ |
| 65 | 25.03 | 980.4 | 0.1614 | 2 346 | 4 187 | 1 926 | 0.659 | 0.0216 | 0.433 × 10 ⁻³ | 1.110 × 10 ⁻⁵ | 2.75 | 1.00 | 0.548 × 10 ⁻³ |
| 70 | 31.19 | 977.5 | 0.1983 | 2 334 | 4 190 | 1 936 | 0.663 | 0.0221 | 0.404 × 10 ⁻³ | 1.126 × 10 ⁻⁵ | 2.55 | 1.00 | 0.578 × 10 ⁻³ |
| 75 | 38.58 | 974.7 | 0.2421 | 2 321 | 4 193 | 1 948 | 0.667 | 0.0225 | 0.378 × 10 ⁻³ | 1.142 × 10 ⁻⁵ | 2.38 | 1.00 | 0.607 × 10 ⁻³ |
| 80 | 47.39 | 971.8 | 0.2935 | 2 309 | 4 197 | 1 962 | 0.670 | 0.0230 | 0.355 × 10 ⁻³ | 1.159 × 10 ⁻⁵ | 2.22 | 1.00 | 0.653 × 10 ⁻³ |
| 85 | 57.83 | 968.1 | 0.3536 | 2 296 | 4 201 | 1 977 | 0.673 | 0.0235 | 0.333 × 10 ⁻³ | 1.176 × 10 ⁻⁵ | 2.08 | 1.00 | 0.670 × 10 ⁻³ |
| 90 | 70.14 | 965.3 | 0.4235 | 2 283 | 4 206 | 1 993 | 0.675 | 0.0240 | 0.315 × 10 ⁻³ | 1.193 × 10 ⁻⁵ | 1.96 | 1.00 | 0.702 × 10 ⁻³ |
| 95 | 84.55 | 961.5 | 0.5045 | 2 270 | 4 212 | 2 010 | 0.677 | 0.0246 | 0.297 × 10 ⁻³ | 1.210 × 10 ⁻⁵ | 1.85 | 1.00 | 0.716 × 10 ⁻³ |
| 100 | 101.33 | 957.9 | 0.5978 | 2 257 | 4 217 | 2 029 | 0.679 | 0.0251 | 0.282 × 10 ⁻³ | 1.227 × 10 ⁻⁵ | 1.75 | 1.00 | 0.750 × 10 ⁻³ |
| 110 | 143.27 | 950.6 | 0.8263 | 2 230 | 4 229 | 2 071 | 0.682 | 0.0262 | 0.255 × 10 ⁻³ | 1.261 × 10 ⁻⁵ | 1.58 | 1.00 | 0.798 × 10 ⁻³ |
| 120 | 198.53 | 943.4 | 1.121 | 2 203 | 4 244 | 2 120 | 0.683 | 0.0275 | 0.232 × 10 ⁻³ | 1.296 × 10 ⁻⁵ | 1.44 | 1.00 | 0.858 × 10 ⁻³ |
| 130 | 270.1 | 934.6 | 1.496 | 2 174 | 4 263 | 2 177 | 0.684 | 0.0288 | 0.213 × 10 ⁻³ | 1.330 × 10 ⁻⁵ | 1.33 | 1.01 | 0.913 × 10 ⁻³ |
| 140 | 361.3 | 921.7 | 1.965 | 2 145 | 4 286 | 2 244 | 0.683 | 0.0301 | 0.197 × 10 ⁻³ | 1.365 × 10 ⁻⁵ | 1.24 | 1.02 | 0.970 × 10 ⁻³ |
| 150 | 475.8 | 916.6 | 2.546 | 2 114 | 4 311 | 2 314 | 0.682 | 0.0316 | 0.183 × 10 ⁻³ | 1.399 × 10 ⁻⁵ | 1.16 | 1.02 | 1.025 × 10 ⁻³ |
| 160 | 617.8 | 907.4 | 3.256 | 2 083 | 4 340 | 2 420 | 0.680 | 0.0331 | 0.170 × 10 ⁻³ | 1.434 × 10 ⁻⁵ | 1.09 | 1.05 | 1.145 × 10 ⁻³ |
| 170 | 791.7 | 897.7 | 4.119 | 2 050 | 4 370 | 2 490 | 0.677 | 0.0347 | 0.160 × 10 ⁻³ | 1.468 × 10 ⁻⁵ | 1.03 | 1.05 | 1.178 × 10 ⁻³ |
| 180 | 1 002.1 | 887.3 | 5.153 | 2 015 | 4 410 | 2 590 | 0.673 | 0.0364 | 0.150 × 10 ⁻³ | 1.502 × 10 ⁻⁵ | 0.983 | 1.07 | 1.210 × 10 ⁻³ |
| 190 | 1 254.4 | 876.4 | 6.388 | 1 979 | 4 460 | 2 710 | 0.669 | 0.0382 | 0.142 × 10 ⁻³ | 1.537 × 10 ⁻⁵ | 0.947 | 1.09 | 1.280 × 10 ⁻³ |
| 200 | 1 553.8 | 864.3 | 7.852 | 1 941 | 4 500 | 2 840 | 0.663 | 0.0401 | 0.134 × 10 ⁻³ | 1.571 × 10 ⁻⁵ | 0.910 | 1.11 | 1.350 × 10 ⁻³ |
| 220 | 2 318 | 840.3 | 11.60 | 1 859 | 4 610 | 3 110 | 0.650 | 0.0442 | 0.122 × 10 ⁻³ | 1.641 × 10 ⁻⁵ | 0.865 | 1.15 | 1.520 × 10 ⁻³ |
| 240 | 3 344 | 813.7 | 16.73 | 1 767 | 4 760 | 3 520 | 0.632 | 0.0487 | 0.111 × 10 ⁻³ | 1.712 × 10 ⁻⁵ | 0.836 | 1.24 | 1.720 × 10 ⁻³ |
| 260 | 4 688 | 783.7 | 23.69 | 1 663 | 4 970 | 4 070 | 0.609 | 0.0540 | 0.102 × 10 ⁻³ | 1.788 × 10 ⁻⁵ | 0.832 | 1.35 | 2.000 × 10 ⁻³ |
| 280 | 6 412 | 750.8 | 33.15 | 1 544 | 5 280 | 4 835 | 0.581 | 0.0605 | 0.094 × 10 ⁻³ | 1.870 × 10 ⁻⁵ | 0.854 | 1.49 | 2.380 × 10 ⁻³ |
| 300 | 8 581 | 713.8 | 46.15 | 1 405 | 5 750 | 5 980 | 0.548 | 0.0695 | 0.086 × 10 ⁻³ | 1.965 × 10 ⁻⁵ | 0.902 | 1.69 | 2.950 × 10 ⁻³ |
| 320 | 11 274 | 667.1 | 64.57 | 1 239 | 6 540 | 7 900 | 0.509 | 0.0836 | 0.078 × 10 ⁻³ | 2.084 × 10 ⁻⁵ | 1.00 | 1.97 | — |
| 340 | 14 586 | 610.5 | 92.62 | 1 028 | 8 240 | 11 870 | 0.469 | 0.110 | 0.070 × 10 ⁻³ | 2.255 × 10 ⁻⁵ | 1.23 | 2.43 | — |
| 360 | 18 651 | 528.3 | 144.0 | 720 | 14 690 | 25 800 | 0.427 | 0.178 | 0.060 × 10 ⁻³ | 2.571 × 10 ⁻⁵ | 2.06 | 3.73 | — |
| 374.14 | 22 090 | 317.0 | 317.0 | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 0.043 × 10 ⁻³ | 4.313 × 10 ⁻⁵ | — | — | — |

Nota 1: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α se pueden calcular a partir de sus definiciones, $\nu = \mu/\rho$ y $\alpha = k/\rho c_p = w/Pr$. Las temperaturas de 0.01°C, 100°C y 374.14°C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

Nota 2: La unidad kJ/kg · °C, para el calor específico, es equivalente a kJ/kg · K y la unidad W/m · °C, para la conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

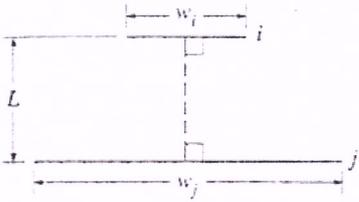
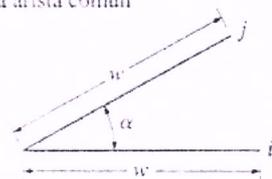
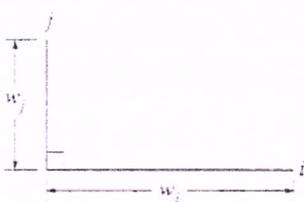
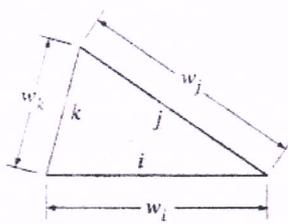
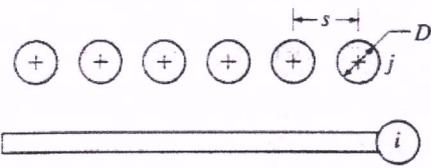
Fuente: Los datos de la viscosidad y la conductividad térmica se tomaron de J. V. Sengers y J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), págs. 291-1322. Los otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

Fuente: YUNUS A Cengel.- Transferencia de calor y masa.-Editorial Mc Grawhill,

ANEXO 6

TABLA 13-2

Expresiones del factor de visión para algunas configuraciones geométricas (infinitamente largas (2D))

| Configuración geométrica | Relación |
|---|--|
| <p>Placas paralelas con sus líneas medias conectadas mediante una recta perpendicular</p>  | $W_i = w_i/L \text{ y } W_j = w_j/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{[(W_i + W_j)^2 + 4]^{1/2} - (W_j - W_i)^2 + 4]^{1/2}}{2W_i}$ |
| <p>Placas inclinadas de anchos iguales y con una arista común</p>  | $F_{i \rightarrow j} = 1 - \sin \frac{1}{2} \alpha$ |
| <p>Placas perpendiculares con una arista común</p>  | $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{w_j}{w_i} - \left[1 + \left(\frac{w_j}{w_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$ |
| <p>Recinto cerrado de tres lados</p>  | $F_{i \rightarrow j} = \frac{w_i + w_j - w_k}{2w_i}$ |
| <p>Plano infinito y fila de cilindros</p>  | $F_{i \rightarrow j} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{D}{s} \tan^{-1} \left(\frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{1/2}$ |

Fuente: YUNUS A Cengel.- Transferencia de calor y masa.-Editorial Mc Grawhill,

ANEXO 7

ABSORTIVIDAD SOLAR DE SUPERFICIES

| <i>METALES</i> | Estado superficial | Absortividad | <i>METALES</i> | Estado superficial | Absortividad |
|----------------|---------------------------|--------------|------------------|--------------------|--------------|
| Aluminio | pulido | 0.10 | Magnesio | pulido | 0.19 |
| Aluminio | anodizado | 0.14 | Magnesio | oxidado | 0.55-0.2 |
| Aluminio | en placas | 0.15 | Niquel | muy pulido | 0.15 |
| Bronce | pulido | 0.3-0.5 | Niquel | pulido | 0.36 |
| Bronce | mate | 0.4-0.65 | Niquel | oxidado | 0.79 |
| Cromo | electroplateado | 0.41 | Platino | brillante | 0.31 |
| Cobre | muy pulido | 0.18 | Plata | muy pulida | 0.07 |
| Cobre | decapado | 0.25 | Plata | pulida | 0.13 |
| Cobre | decolorada por exposición | 0.64 | Acero inoxidable | pulido | 0.33 |
| Oro | | 0.21 | Acero inoxidable | decapado | 0.52 |
| Hierro | galvanizado pulido | 0.34 | Tungsteno | muy pulido | 0.37 |
| Hierro | galvanizado nuevo | 0.64 | Cinc | muy pulido | 0.34 |
| Hierro | mate, oxidado | 0.96 | Cinc | pulido | 0.55 |

Fuente: <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla3.pdf>

ANEXO 8

2.- EMISIVIDADES NORMALES

| METALES | Estado superficie | Temperatura (°C) | Emisividad | NO METALES | Estado superficie | Temperatura (°C) | Emisividad |
|-----------|----------------------|------------------|-------------|--------------------|--------------------|------------------|------------|
| Aluminio | placa pulida | 25 | 0,040 | Amianto | en cartón | 37 | 0,960 |
| Aluminio | placa pulida | 200-600 | 0,038-0,06 | Amianto | en papel | 37 | 0,930 |
| Aluminio | oxidado | 100-500 | 0,20-0,33 | Labillo | magnesita refracta | 1000 | 0,380 |
| Aluminio | placa mate | 25 | 0,070 | Labillo | rojo, rugoso | 20 | 0,930 |
| Antimonio | pulido | 37-260 | 0,28-0,31 | Labillo | gris, satinado | 1100 | 0,750 |
| Latón | oxidado | 200-500 | 0,600 | Labillo | silice | 540 | 0,800 |
| Latón | pulido | 20-300 | 0,05-0,032 | Carbón | filamento | 1050-1400 | 0,526 |
| Latón | placa usada | 50-350 | 0,220 | Carbón | carbonilla hajas | 95-270 | 0,953 |
| Latón | mate | 50 | 0,202 | Carbón | negro de humo | 20 | 0,930 |
| Cromo | pulido | 37-1100 | 0,058 | Cerámica | alfarera, satinado | 20 | 0,900 |
| Cobre | negro oxidado | 37 | 0,780 | Cerámica | porcelana | 22 | 0,920 |
| Cobre | ligeramente mate | 25 | 0,037 | Cerámica | refractaria, negra | 93 | 0,940 |
| Cobre | pulido | 37-260 | 0,04-0,05 | Arcilla | caldeada | 70 | 91 |
| Cobre | pulido electrolítico | 80 | 0,018 | Hormigón | rugoso | 37 | 0,94 |
| Oro | no pulido | 20 | 0,470 | Vidrio | liso | 22 | 0,940 |
| Oro | pulido | 37-260 | 0,020 | Vidrio | Pyrex, plomo, rosa | 260-530 | 0,95-0,95 |
| Hierro | oxidado | 100 | 0,740 | Hielo | liso | 0 | 0,966 |
| Hierro | esmerilado | 20 | 0,240 | Hielo | rugoso | 0 | 0,985 |
| Hierro | pulido | 425-1025 | 0,14-0,38 | Mármol | grano fino pulido | 22 | 0,93 |
| Hierro | pulido electrolítico | 175-225 | 0,052-0,064 | Mica | | 37 | 0,75 |
| Hierro | todo oxidado | 20 | 0,69 | Mampostería | emplastecida | 0 | 0,930 |
| Hierro | laminado | 925-1100 | 0,87-0,95 | Papel | ordinario | 20 | 0,8-0,9 |
| Fundición | mecanizada | 22 | 0,44 | Papel | amianto | 20 | 0,950 |
| Fundición | oxidada a 600°C | 200-600 | 0,64-0,78 | Papel | alquitranado | 20 | 0,910 |
| Plomo | oxidado a 200°C | 200 | 0,63 | Papel | ordinario | 95 | 0,920 |
| Plomo | oxidado gris | 23 | 0,280 | Yeso blanco | rugosa | 20 | 0,930 |
| Plomo | pulido | 130-260 | 0,08-0,056 | Porcelana | vidriada | 20 | 0,930 |
| Magnesio | pulido | 37-260 | 0,07-0,13 | Casco fundido | rugoso | 20 | 0,930 |
| Magnesio | oxidado | 275-825 | 0,55-0,2 | Goma blanda | gris | 25 | 0,860 |
| Moildeno | para filamentos | 700-2600 | 0,10-0,20 | Goma dura | negra rugosa | 25 | 0,950 |
| Moildeno | pulido | 150-490 | 0,02-0,05 | Madera de haya | láminas | 25 | 0,935 |
| Mercurio | pulido | 37 | 0,170 | Madera de encina | láminas | 25 | 0,885 |
| Niquel | oxidado a 600°C | 260-540 | 0,37-0,48 | Tierra | | 37 | 0,950 |
| Niquel | pulido | 100-260 | 0,045-0,07 | PINTURAS | | | |
| Niquel | electrolítico | 37-260 | 0,04-0,06 | Aluminio | bronce de | 100 | 0,300 |
| Platino | electrolítico | 260-540 | 0,06-0,1 | Aluminio | esmalto rugoso | 20 | 0,390 |
| Platino | placa pulida | 260-540 | 0,06-0,1 | Aluminio pintado | calentado a 325°C | 150-300 | 0,350 |
| Platino | oxidado a 600°C | 260-540 | 0,07-0,11 | Aluminio | Al 10%, laca 22% | 100 | 0,520 |
| Platino | filamento | 26-1225 | 0,04-0,19 | Aluminio | Al 26%, laca 27% | 100 | 0,300 |
| Plata | pulida, pura | 225-625 | 0,02-0,03 | Laca | blanca | 100 | 0,925 |
| Plata | pulida | 37-370 | 0,02-0,03 | Laca | negra mate | 80 | 0,970 |
| Aceero | pulido | 23 | 0,160 | Aceite | pintura | 20 | 0,89-0,97 |
| Estato | brillante | 225-265 | 0,02-0,03 | Aceite pintura | todos los colores | 100 | 0,92-0,96 |
| Estato | pulido | 37-370 | 0,070 | Baquelita | esmalto | 80 | 0,935 |
| Tungsteno | para filamentos | 3300 | 0,390 | Formalde | blanco rugoso | 20 | 0,900 |
| Tungsteno | filamento envaseci | 25-3300 | 0,03-0,35 | Formalde | negro brillante | 25 | 0,876 |
| Cinc | oxidado | 20 | 0,250 | Pintura al aceite | | 1-200 | 0,885 |
| Cinc | pulido | 225-325 | 0,05-0,06 | Impregnación minio | | 20-1100 | 0,930 |

Fuente: <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla2.pdf>

ANEXO 9

| Composición | Punto de fusión, K | Propiedades a 300 K | | | | Propiedades a varias temperaturas (K), k(W/m · K)/c _p (J/kg · K) | | | | | |
|--|--------------------|------------------------|----------------------------|--------------|--|--|------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| | | ρ kg/m ³ | c _p J/kg · K | k W/m · K | α × 10 ⁶ m ² /s | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1 000 |
| | | | | | | | | | | | |
| Al carbono-manganeso-silicio (1% < Mn < 1.65% 0.1% < Si < 0.6%) | 8 131 | 434 | 41.0 | 11.6 | | | | 42.2 487 | 39.7 559 | 35.0 685 | 27.6 1 090 |
| Aceros al cromo (bajo): ½ Cr-½ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si) | 7 822 | 444 | 37.7 | 10.9 | | | | 38.2 | 36.7 | 33.3 | 26.9 |
| 1Cr-½ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si) | 7 858 | 442 | 42.3 | 12.2 | | | | 492 | 575 | 688 | 969 |
| 1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V) | 7 836 | 443 | 48.9 | 14.1 | | | | 42.0 | 39.1 | 34.5 | 27.4 |
| Aceros inoxidables: | | | | | | | | 492 | 575 | 688 | 969 |
| AISI 302 | 8 055 | 480 | 15.1 | 3.91 | | | | 46.8 | 42.1 | 36.3 | 28.2 |
| AISI 304 | 1 670 | 7 900 | 477 | 14.9 | 3.95 | 9.2 | 12.6 | 492 | 575 | 688 | 969 |
| AISI 316 | 8 238 | 468 | 13.4 | 3.48 | | 272 | 402 | 17.3 | 20.0 | 22.8 | 25.4 |
| AISI 347 | 7 978 | 480 | 14.2 | 3.71 | | | | 512 | 559 | 585 | 606 |
| Plomo | 601 | 11 340 | 129 | 35.3 | 24.1 | 39.7 | 36.7 | 15.2 | 18.3 | 21.3 | 24.2 |
| Magnesio | 923 | 1 740 | 1 024 | 156 | 87.6 | 118 | 125 | 504 | 550 | 576 | 602 |
| Molibdeno | 2 894 | 10 240 | 251 | 138 | 53.7 | 179 | 143 | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Puro | 1 728 | 8 900 | 444 | 90.7 | 23.0 | 164 | 107 | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | 232 | 383 | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.2 | 18.3 | 21.3 | 24.2 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 504 | 550 | 576 | 602 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Níquel: Puro | | | | | | | | | | | |

ANEXO 10

860
APENDICE 1

TABLA A.15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

| Temperatura, T , °C | Densidad, ρ , kg/m ³ | Calor específico, c_p , J/kg·K | Conductividad térmica, k , W/m·K | Difusividad térmica, α , m ² /s | Viscosidad dinámica, μ , kg/m·s | Viscosidad cinemática, ν , m ² /s | Número de Prandtl, Pr |
|--------------------------|---|--|--|---|---|--|-------------------------------|
| -150 | 2.866 | 983 | 0.01171 | 4.158×10^{-6} | 8.636×10^{-6} | 3.013×10^{-6} | 0.7246 |
| -100 | 2.038 | 966 | 0.01582 | 8.036×10^{-6} | 1.189×10^{-5} | 5.837×10^{-6} | 0.7263 |
| -50 | 1.582 | 999 | 0.01979 | 1.252×10^{-5} | 1.474×10^{-5} | 9.319×10^{-6} | 0.7440 |
| -40 | 1.514 | 1002 | 0.02057 | 1.356×10^{-5} | 1.527×10^{-5} | 1.008×10^{-5} | 0.7436 |
| -30 | 1.451 | 1004 | 0.02134 | 1.465×10^{-5} | 1.579×10^{-5} | 1.087×10^{-5} | 0.7425 |
| -20 | 1.394 | 1005 | 0.02211 | 1.578×10^{-5} | 1.630×10^{-5} | 1.169×10^{-5} | 0.7408 |
| -10 | 1.341 | 1006 | 0.02288 | 1.696×10^{-5} | 1.680×10^{-5} | 1.252×10^{-5} | 0.7387 |
| 0 | 1.292 | 1006 | 0.02364 | 1.818×10^{-5} | 1.729×10^{-5} | 1.338×10^{-5} | 0.7362 |
| 5 | 1.269 | 1006 | 0.02401 | 1.880×10^{-5} | 1.754×10^{-5} | 1.382×10^{-5} | 0.7350 |
| 10 | 1.246 | 1006 | 0.02439 | 1.944×10^{-5} | 1.778×10^{-5} | 1.426×10^{-5} | 0.7336 |
| 15 | 1.225 | 1007 | 0.02476 | 2.009×10^{-5} | 1.802×10^{-5} | 1.470×10^{-5} | 0.7323 |
| 20 | 1.204 | 1007 | 0.02514 | 2.074×10^{-5} | 1.825×10^{-5} | 1.516×10^{-5} | 0.7309 |
| 25 | 1.184 | 1007 | 0.02551 | 2.141×10^{-5} | 1.849×10^{-5} | 1.562×10^{-5} | 0.7296 |
| 30 | 1.164 | 1007 | 0.02588 | 2.208×10^{-5} | 1.872×10^{-5} | 1.608×10^{-5} | 0.7282 |
| 35 | 1.145 | 1007 | 0.02625 | 2.277×10^{-5} | 1.895×10^{-5} | 1.655×10^{-5} | 0.7268 |
| 40 | 1.127 | 1007 | 0.02662 | 2.346×10^{-5} | 1.918×10^{-5} | 1.702×10^{-5} | 0.7255 |
| 45 | 1.109 | 1007 | 0.02699 | 2.416×10^{-5} | 1.941×10^{-5} | 1.750×10^{-5} | 0.7241 |
| 50 | 1.092 | 1007 | 0.02735 | 2.487×10^{-5} | 1.963×10^{-5} | 1.798×10^{-5} | 0.7228 |
| 60 | 1.059 | 1007 | 0.02808 | 2.632×10^{-5} | 2.008×10^{-5} | 1.896×10^{-5} | 0.7202 |
| 70 | 1.028 | 1007 | 0.02881 | 2.780×10^{-5} | 2.052×10^{-5} | 1.995×10^{-5} | 0.7177 |
| 80 | 0.9994 | 1008 | 0.02953 | 2.931×10^{-5} | 2.096×10^{-5} | 2.097×10^{-5} | 0.7154 |
| 90 | 0.9718 | 1008 | 0.03024 | 3.086×10^{-5} | 2.139×10^{-5} | 2.201×10^{-5} | 0.7132 |
| 100 | 0.9458 | 1009 | 0.03095 | 3.243×10^{-5} | 2.181×10^{-5} | 2.306×10^{-5} | 0.7111 |
| 120 | 0.8977 | 1011 | 0.03235 | 3.565×10^{-5} | 2.264×10^{-5} | 2.522×10^{-5} | 0.7073 |
| 140 | 0.8542 | 1013 | 0.03374 | 3.898×10^{-5} | 2.345×10^{-5} | 2.745×10^{-5} | 0.7041 |
| 160 | 0.8148 | 1016 | 0.03511 | 4.241×10^{-5} | 2.420×10^{-5} | 2.975×10^{-5} | 0.7014 |
| 180 | 0.7788 | 1019 | 0.03646 | 4.593×10^{-5} | 2.504×10^{-5} | 3.212×10^{-5} | 0.6992 |
| 200 | 0.7459 | 1023 | 0.03779 | 4.954×10^{-5} | 2.577×10^{-5} | 3.455×10^{-5} | 0.6974 |
| 250 | 0.6746 | 1033 | 0.04104 | 5.890×10^{-5} | 2.760×10^{-5} | 4.091×10^{-5} | 0.6946 |
| 300 | 0.6158 | 1044 | 0.04418 | 6.871×10^{-5} | 2.934×10^{-5} | 4.765×10^{-5} | 0.6935 |
| 350 | 0.5664 | 1056 | 0.04721 | 7.892×10^{-5} | 3.101×10^{-5} | 5.475×10^{-5} | 0.6937 |
| 400 | 0.5243 | 1069 | 0.05015 | 8.951×10^{-5} | 3.261×10^{-5} | 6.219×10^{-5} | 0.6948 |
| 450 | 0.4880 | 1081 | 0.05298 | 1.004×10^{-4} | 3.415×10^{-5} | 6.997×10^{-5} | 0.6965 |
| 500 | 0.4565 | 1093 | 0.05572 | 1.117×10^{-4} | 3.563×10^{-5} | 7.806×10^{-5} | 0.6986 |
| 600 | 0.4042 | 1115 | 0.06093 | 1.352×10^{-4} | 3.846×10^{-5} | 9.515×10^{-5} | 0.7037 |
| 700 | 0.3627 | 1135 | 0.06581 | 1.598×10^{-4} | 4.111×10^{-5} | 1.133×10^{-4} | 0.7092 |
| 800 | 0.3289 | 1153 | 0.07037 | 1.855×10^{-4} | 4.362×10^{-5} | 1.326×10^{-4} | 0.7149 |
| 900 | 0.3008 | 1169 | 0.07465 | 2.122×10^{-4} | 4.600×10^{-5} | 1.529×10^{-4} | 0.7206 |
| 1000 | 0.2772 | 1184 | 0.07868 | 2.398×10^{-4} | 4.826×10^{-5} | 1.741×10^{-4} | 0.7260 |
| 1500 | 0.1990 | 1234 | 0.09599 | 3.908×10^{-4} | 5.817×10^{-5} | 2.922×10^{-4} | 0.7478 |
| 2000 | 0.1553 | 1264 | 0.11113 | 5.664×10^{-4} | 6.630×10^{-5} | 4.270×10^{-4} | 0.7539 |

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , ν y α a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermanns, IFI/Plenum, NY, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: YUNUS A Cengel.- Transferencia de calor y masa.-Editorial Mc

Grawhill