

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALEFACCION SOLAR PARA LA
POSTA DE SALUD DEL POBLADO DE LANGUI**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller

DIEGO JESUS SILVA JASAU

ASESOR: Miguel Ángel Hadzich Marín

Lima, febrero 2016

RESUMEN

Desde hace muchos años, en la región alto andina se vienen produciendo las denominadas heladas, afectando a la población de la zona alto andina de nuestro país. Al tratarse de una condición climatológica recurrente es que debemos generar tecnologías adecuadas y acordes a las poblaciones con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas.

Asimismo estas condiciones de fríos extremos o similares se ven reflejadas en el ausentismo de las madres gestantes a la posta médica de la localidad, hecho que motiva preocupación, puesto que, es el lugar más apropiado para los controles médicos y el alumbramiento respectivo. Considerando el factor del frío como una de las fuentes de ausentismo, es que se propone desarrollar la presente tesis, con la finalidad de brindar a la posta de salud la alternativa de instalar un sistema de calefacción solar y que el mismo sea replicable por los pobladores en general.

La presente abarca los principales antecedentes de la comunidad de Langui, relacionados al sistema de calefacción, dentro de los mismos destacan el recurso solar disponible y las bajas temperaturas que se presentan.

Los capítulos segundo y tercero, son una recopilación de los principales conceptos teóricos necesarios para el diseño del sistema y las condiciones tecnológicas actuales. En relación a los conceptos teóricos al tratarse de un sistema solar se presentan los diferentes ángulos en el aprovechamiento solar, conceptos generales para el correcto manejo de información estadística y los conceptos relacionados con la transferencia de calor. Con relación al estado actual de la tecnología, se presentan los principales componentes de un sistema y los arreglos más comunes actualmente.

En el cuarto capítulo, se presentan los requerimientos del proyecto, indicando las exigencias que debe cumplir el mismo con la finalidad de satisfacer la necesidad real de la población. En esta parte se selecciona la solución óptima y se procede a realizar los cálculos requeridos para consolidar el diseño.

Posteriormente, se presenta una metodología desarrollada para poder replicar el presente sistema en diferentes ubicaciones y condiciones, dentro de las cuales destacan el recurso solar disponible, la velocidad del viento en la zona y las dimensiones del recinto a calentar. Esta metodología pretende alcanzar a todos aquellos interesados una guía muy simple para el dimensionamiento de un sistema en una aplicación diferente a la posta de salud.

Se construyó el sistema con la finalidad de garantizar que este pueda ser construido con herramientas básicas y recursos limitados, verificándose que el ensamble del mismo es muy sencillo y que los trabajos de carpintería no son complejos. Con este prototipo se realizaron pruebas referenciales que se presentan en los anexos, las cuales mostraron muy buenos resultados alcanzando los objetivos planteados y validando la teoría aplicada.


 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO
 TÍTULO **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALEFACCION SOLAR
 PARA LA POSTA DE SALUD DEL POBLADO DE
 LANGUI.**

ÁREA Energía # 331
 PROPUESTO POR Ing. Miguel Ángel Hadzich Marín
 ASESOR Ing. Miguel Ángel Hadzich Marín
 TESISISTA Diego Jesús Silva Jasauí
 CÓDIGO 20042182
 FECHA 30 de octubre de 2015

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 Facultad de Ciencias e Ingeniería

 30 NOV 2015
 MI UEL MEJIA PUENTE
 DECANO

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

En el poblado de Langui situado en la provincia de Canas en el departamento de Cusco en Perú, así como en toda la región andina se alcanzan temperaturas menores a los 0 Grados Celsius en épocas de invierno, por tal motivo, es necesario desarrollar tecnología para sobrellevarlas. Estas temperaturas generan en la población de Langui un ausentismo a la posta de salud, debido a la falta de confort térmico en la misma; lo cual repercute en la calidad de los partos y posibles complicaciones tanto en los recién nacidos como en las madres.

El objetivo de la presente tesis es de disminuir el ausentismo causado por la falta de confort térmico al diseñar un sistema de calefacción solar para la misma.

Los alcances de la tesis son el diseño de un sistema de calefacción para la posta de salud, el cual deberá poder ser replicable por los pobladores de la región para lo cual se desarrollara un procedimiento de selección para diferentes ubicaciones.

JAV





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALEFACCION SOLAR PARA LA

Introducción **POSTA DE SALUD DEL POBLADO DE LANGUI**

1. Antecedentes
2. Marco teórico
3. Estado del arte
4. Diseño y cálculos
5. Procedimiento de selección

Planos

Observaciones y Recomendaciones

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Ing. Miguel Angel Hadzich Ma

Asesor



ÍNDICE

RESUMEN	i
ÍNDICE.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	3
1.1 Problemática de la posta de salud de Langui.....	3
1.2 Justificación del desarrollo de un sistema de calefacción	4
1.3 Análisis de la población	4
1.4 Infraestructura local	4
1.5 Condiciones Climáticas	5
1.6 Recurso solar	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 La energía solar	12
2.2 Ángulos importantes en energía solar	14
2.3 Longitudes de onda y sus características principales	16
2.4 Mecanismos de transferencia de calor	17
2.5 Confort térmico.....	22
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE	23
3.1 Subsistema de captación	24
3.1.1 Componentes de un sistema de captación	25
3.1.1.1 Principales tipos de subsistemas de captación.....	27
3.2 Subsistema hidráulico o neumático	27

3.3 Subsistema de intercambio	28
3.4 Subsistema de acumulación.....	29
3.5 Subsistema de control.....	29
CAPÍTULO 4. DISEÑO Y CÁLCULOS	30
4.1 Lista de exigencias.....	30
4.2 Estructura de funciones de la solución óptima.....	32
4.3 Matriz Morfológica y proyecto solución optimo	33
4.4 Cálculos	37
4.4.1 Cálculo del área del colector <i>AC</i>	39
4.4.2 Calculo de la irradiancia solar absorbida	41
4.4.3 Cálculo del coeficiente de pérdidas de calor del sistema.....	63
4.4.4 Determinación del calor útil del sistema.....	78
CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL PROCESO DE SELECCIÓN	80
5.1 Definición de los parámetros de selección a emplear.....	80
5.2 Método de selección	82
PLANOS	85
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
Anexo 1 - Construcción y Pruebas	92
Construcción	92
Pruebas experimentales.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_C : Área de captación del colector [m^2].
- A_s : Área de la superficie [m^2].
- D : Diámetro o Longitud característica [m].
- E : Potencia emisiva de la superficie [W/m^2].
- E_g : Energía que se genera en el sistema [kWh].
- E_{ing} : Energía que ingresa al sistema [kWh].
- E_{perd} : Energía pérdida por el sistema [kWh].
- E_{sal} : Energía que sale del sistema [kWh].
- E_{solar} : Energía solar disponible [kWh].
- $E_{útil}$: Energía útil o aprovechada por el sistema [kWh].
- G : Irradiancia global [W/m^2].
- g : Constante de gravitación [m/s^2].
- G_b : Irradiación directa, se utiliza el subíndice b correspondiente al término en inglés beam [W/m^2].
- G_d : Irradiancia difusa [W/m^2].
- G_o : Irradiación extraterrestre para el enésimo día del año sobre una superficie horizontal [W/m^2].
- G_{on} : Irradiación extraterrestre para el enésimo día del año sobre el plano normal a la irradiación solar [W/m^2].
- G_{sc} : Constante solar, su valor medio es de $1,353 W/m^2$ o $4.92 MJ/m^2 h$.
- h_{conv} : Coeficiente de convección [W/mK].
- H_d : Irradiación mensual difusa [MJ/m^2].
- K : Coeficiente de extinción de la cubierta [m^{-1}].

- k : Conductividad térmica del material [W/mK].
- K_T : Índice de claridad [Adimensional].
- L : Longitud por la cual se genera la transferencia de calor, espesor de las cubiertas, longitud característica [m].
- L_{loc} : Longitud de la localidad [Grados sexagesimales].
- L_{st} : Longitud del meridiano estándar con el cual se determina la hora de la ubicación geográfica [Grados sexagesimales].
- n : Enésimo día del año, Índice refractario de la cubierta [Adimensional].
- N : Cantidad de horas de luz solar diaria [horas].
- q_{conv} : Flujo de calor por convección por unidad de área [W/m²].
- q_{cond} : Flujo de calor por conducción por unidad de área [W/m²].
- Q_{cond} : Calor transmitido por conducción [W].
- Q_{conv} : Calor transmitido por convección [W].
- Q_{perd} : Calor cedido como pérdidas por el sistema [W].
- Q_{solar} : Calor solar disponible [W].
- $Q_{útil}$: Calor útil o aprovechado por el sistema [W].
- Ra : Número de Rayleigh [Adimensional].
- R_b : Factor geométrico de irradiación directa entre superficies inclinadas y planas [Adimensional].
- S : Irradiancia solar absorbida por el colector [W/m²].
- T_a : Temperatura ambiente [K].
- T_{pm} : Temperatura media de la placa absorbidora [K].
- T_s : Temperatura de la superficie [K].
- T_1 : Temperatura de la superficie en el punto 1 [K].
- T_2 : Temperatura de la superficie en el punto 2 [K].

- T_{∞} : Temperatura infinita del fluido [K].
 U_L : Coeficiente global de pérdidas de transferencia de calor [W/m²K].
 μ : Viscosidad dinámica del fluido [kg/ms].
 v_s : Velocidad característica del fluido [m/s].
 β : Ángulo de inclinación del colector [Grados sexagesimales].
 β' : Coeficiente volumétrico [K⁻¹].
 δ : Ángulo de declinación [Grados sexagesimales].
 ε : Emisividad de la superficie [Adimensional].
 θ : Ángulo de incidencia [Grados sexagesimales].
 θ_z : Ángulo zenith o de incidencia sobre una superficie horizontal [Grados sexagesimales].
 ν : Viscosidad cinemática del fluido [m²/s].
 ρ : Densidad del fluido [kg/m³].
 ρ_g : Reflectancia del suelo [Adimensional].
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es 5.67×10^{-8} [W/m² K⁴].
 $(\tau\alpha)_b$: Producto Transmitancia-absortancia directo [Adimensional].
 $(\tau\alpha)_d$: Producto Transmitancia-absortancia difuso [Adimensional].
 $(\tau\alpha)_g$: Producto Transmitancia-absortancia del suelo [Adimensional].
 ϕ : Latitud de la ubicación geográfica [Grados sexagesimales].
 ω : Ángulo horario [Grados sexagesimales].
 ω_a : Ángulo horario correspondiente al amanecer [Grados sexagesimales].
 ω_s : Ángulo horario correspondiente al ocaso, se utiliza el subíndice *s* correspondiente al termino en inglés *sunset* [Grados sexagesimales].
 ΔE_{alm} : Variación en la energía almacenada en el sistema [kWh].

LISTA DE FIGURAS

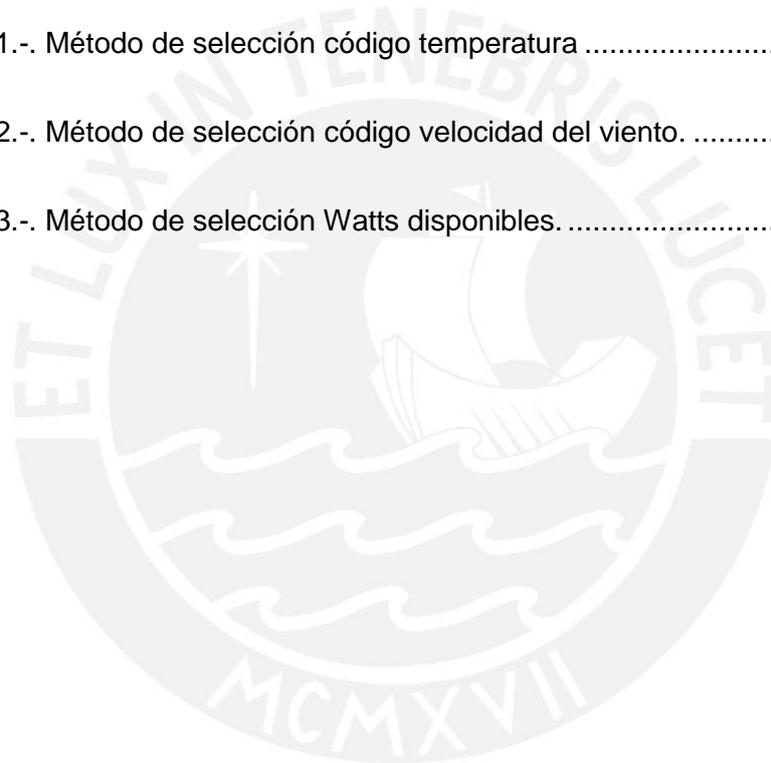
Figura 1.5.1. - Mapa de Temperatura mínima absoluta registro histórico – fuente Atlas de heladas del Perú - SENAMHI	6
Figura 1.5.2. -Frecuencia de Heladas Temperatura menor igual a cero grados Celsius – fuente Atlas de heladas del Perú - SENAMHI.....	7
Figura 1.6.1. -Mapas del Recurso Solar en el Perú para los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y el promedio anual. – Fuente SENAMHI Atlas Solar.....	9
Figura 1.6.2. Mapa de Recurso Solar para la región Cusco – Fuente SENAMHI Atlas Solar	10
Figura 2.2.1. – Adaptación de Solar Engineering Thermal Processes (Duffie y Beckman 2013).....	15
Figura 2.4.2. – Reflexión, absorción y transmisión adaptación de Fundamentos de transferencia de calor (Incropera Dewitt 1996).....	20
Figura 3.2.1. – Sistema de ductos más comunes en colectores de aire.	28
Figura 4.2.1. – Estructura de funciones del sistema	33
Figura 4.3.1 – Gráfica resultado Exigencias de diseño vs. Técnico – Económico.....	36
Figura 4.3.2– Proyecto solución óptimo – Idea conceptual Grupo de apoyo al sector rural PUCP	37
Figura 4.4.1. – Diagrama Energético del colector solar	38
Figura 4.4.1.1. – Cálculo del Área del colector	40

Figura 4.4.2.1. – Ratio de irradiación directa y difusa extraído del libro Engineering of Thermal Processes basado en el estudio de Erbs.....	50
Figura 4.4.2.2. – Distribución de Irradiancia diaria en Langui para el mes de mayo. ...	51
Figura 4.4.2.3. – Cálculo irradiación para -3.5 hora del medio día solar.	52
Figura 4.4.2.4.– Relación entre los ángulos de incidencia y refracción, adaptacion de engineering of thermal processes.....	56
Figura 4.4.2.5.– Ángulo de incidencia efectivo para irradiación difusa y reflexión del suelo extraído de Solar engineering of thermal procesees.	61
Figura 4.4.3.1. – Esquema de flujos de calor en el colector.....	64
Figura 4.4.3.2. – Proceso de determinación del Coeficiente de pérdidas de calor del sistema.....	65
Figura 4.4.3.3. – Sección del colector solar y las pérdidas de calor.....	66
Figura 4.4.3.4.- Diagrama de resistencias equivalentes.	66
Figura 4.4.3.5. – Coeficiente global de pérdidas bajo diferentes condiciones.	78
Figura 5.2.1.-. Ejemplo de uso de las tablas de selección.	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.5.1. - Resumen de temperaturas de los meses con mayor registro de heladas.	8
Tabla 2.3.1. - Resumen espectro electromagnético vs. Longitud de onda y energía disponible.....	16
Tabla 2.4.1. – Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección	19
Tabla 3.1.1.1 – Propiedades básicas de las cubiertas.....	25
Tabla 4.1.1. – Lista de Exigencias del Proyecto.....	31
Tabla 4.3.1. – Análisis Técnico Económico de los conceptos solución.....	34
Tabla 4.3.2. – Análisis de exigencias de diseño conceptos solución.	35
Tabla 4.4.1.1 – Espesores de calamina convencional.....	40
Tabla 4.4.2.1.-Día promedio de irradiación solar mensual.....	43
Tabla 4.4.2.2.-Ángulos de declinación y día promedio mensual.	45
Tabla 4.4.2.3. – Ángulos horario a evaluar.....	46
Tabla 4.4.2.4. – Cálculo de la Irradiancia sobre superficies planas para diferentes horas.....	47
Tabla 4.4.2.5. – Cálculo de la Irradiancia sobre superficies planas para diferentes horas.....	48
Tabla 4.4.2.6. – Resultados del cálculo de Irradiación global, directa y difusa.....	53
Tabla 4.4.2.7. – Resultados del Factor de Irradiación geométrica.	55

Tabla 4.4.2.8. – Propiedades ópticas Polimetilmetracrilato (PMMA).....	56
Tabla 4.4.2.9.– Resultados del cálculo de Transmitancia, reflexión y absortividad	62
Tabla 4.4.2.10. – Resultados de Irradiancia [W/m ²].....	63
Tabla 4.4.3.1 – Propiedades del aire a las temperaturas en análisis	69
Tabla 4.4.4.1 – Calor útil aportado y eficiencia del sistema.	78
Tabla 5.2.1.-. Método de selección código temperatura	82
Tabla 5.2.2.-. Método de selección código velocidad del viento.	82
Tabla 5.2.3.-. Método de selección Watts disponibles.....	83



INTRODUCCIÓN

La geografía tan variada de nuestro país, los escasos recursos económicos y el difícil acceso a los poblados situados en la región alto andina, generan en la actualidad en ellas muchas necesidades sociales. Durante las épocas de friaje y/o heladas, los pobladores de la zona viven en condiciones infrahumanas, ya que, la temperatura desciende a niveles en los cuales la infraestructura actual no logra brindarles en su interior temperaturas apropiadas para el desarrollo normal de sus actividades.

Particularmente en el poblado de Langui, ubicado en la provincia de Canas, departamento de Cusco, hay una problemática con respecto al confort térmico en la posta de salud, uno de los que destaca como producto de esta insatisfacción térmica es la preferencia por parte de las madres gestantes en realizar el nacimiento de sus hijos en sus hogares, en donde no se cuenta con los equipos y profesionales necesarios.

Las instalaciones solares térmicas tienen como fin principal aprovechar la energía proveniente del sol para elevar la temperatura de un fluido y así poder hacer uso de este recurso de manera productiva.

La presente tesis, tiene como objetivo eliminar esta incomodidad térmica en la posta de salud de Langui y con ello incentivar el uso de esta para que puedan llevar a cabo el nacimiento de los hijos de los pobladores, ya que este es el lugar más apropiado para realizarlo.

Para poder lograr esto, se realizará un estudio de las condiciones climáticas de la región, la cual se desarrolla en el primer capítulo.

En el segundo capítulo, se presentan los fundamentos teóricos necesarios para desarrollar el sistema de calefacción solar.

En el tercer capítulo, se realiza un estudio del estado actual del arte, el cual, en la actualidad, tiene la tendencia a utilizar la energía solar para elevar la temperatura del agua sanitaria de las residencias y el uso de muros trombes cuando se busca calentar aire. Se revisarán los principios de los denominados colectores solares planos y sus principales variaciones.

En el cuarto capítulo, se muestra la metodología de diseño, así como los cálculos matemáticos realizados. Se presenta, además, el análisis entre las distintas soluciones planteadas y el desarrollo de los respectivos cálculos que fundamentan el diseño de la solución óptima.

En el último capítulo, el quinto, se desarrolla y presenta una metodología para la selección de sistemas de calefacción para diferentes ubicaciones, dando el ejemplo particular el caso de la posta de salud de Langui. Dicha metodología permite utilizar la tecnología en diferentes lugares de la región alto andina, con lo cual se espera que la tecnología pueda ser aplicada por los pobladores de dicha región.

Luego se presentarán los planos del sistema de calefacción solar.

Finalmente, se detallarán las conclusiones de la tesis, las cuales serán acordes a los objetivos principales y específicos planteados.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

El poblado andino de Langui pertenece a la provincia de Canas, departamento de Cusco, está ubicado aproximadamente a seis horas de la ciudad del Cusco en automóvil y se encuentra a una altura aproximada de 3,900 m.s.n.m. En los últimos años se han desarrollado diferentes tecnologías, así como, tesis para su aplicación directa en el poblado de Langui, debido a la buena disposición de sus pobladores. Las condiciones climatológicas en la zona son bastante frías sobre todo en las épocas de heladas, lo que genera una calidad de vida no óptima para los habitantes. En el ámbito económico, como es común en la región alto andina del Perú el poder adquisitivo es muy limitado. En la actualidad, se está promoviendo el desarrollo del turismo en la región debido a que cuenta con una hermosa laguna con un área aproximada de 16 x 5 Km² y una profundidad máxima de 232 metros, con lo que se espera que mejore la economía.

1.1 Problemática de la posta de salud de Langui

En la actualidad, se busca promover el nacimiento de niños en la posta de salud, lo cual no ha tenido mucha acogida debido a razones culturales y a la falta de confort térmico

que sienten las mujeres gestantes. La presente tesis busca eliminar esta última razón de ausentismo en la posta de salud, para así promover una mejor atención médica tanto de las madres como de los recién nacidos.

1.2 Justificación del desarrollo de un sistema de calefacción

La justificación del presente documento es elevar la calidad en el servicio de salud vital ofrecido a los pobladores de la zona.

La mejora en la calidad del servicio de salud se verá reflejada al generarse un ambiente más agradable para los usuarios de la posta, enfocándonos en el problema de ausentismo de las madres gestantes al establecimiento, para sostener sus labores de parto.

Adicionalmente, al contar con una posta de salud con un mayor nivel de confort se contribuirá con el desarrollo del turismo y por ende la economía del poblado.

1.3 Análisis de la población

La población de Langui se caracteriza por ser emprendedora, busca ser un distrito líder y pionero a nivel de las provincias alto andinas, para lograr esto, ellos se encuentran en la búsqueda de tecnologías apropiadas para su desarrollo económico y social.

La cantidad de habitantes de Langui es alrededor de 3,000 personas, siendo bastante equitativa la distribución de género de la misma, aproximadamente 50.08 % son hombres y el 49.92 % son mujeres.

1.4 Infraestructura local

La infraestructura de la zona está básicamente hecha en construcciones de adobe. La construcción de la posta de salud se realizó en adobe revestida con cemento yeso, debido a la sencillez de su construcción, el sistema de calefacción deberá mantener cierto nivel de simpleza para confluir con la infraestructura de la misma; con esto se buscará evitar el rechazo de la población así como la implementación del sistema en sus propios hogares.

1.5 Condiciones Climáticas

El piso altitudinal alto andino del departamento de Cusco se encuentra situado entre los 3,800 y 3,900 m.s.n.m., el cual posee un clima frío, teniendo temperaturas máximas alrededor de los 20 grados Celsius, por las noches las temperaturas decaen hasta valores promedio de 10 grados bajo cero alcanzando mínimos de 20 grados bajo cero Celsius, presentándose las temperaturas más bajas entre los meses de mayo y agosto.

De acuerdo al Atlas de Heladas del Perú publicado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI, Langui se encuentran en la zona geográfica donde se han registrado las menores temperaturas históricas de nuestro país.

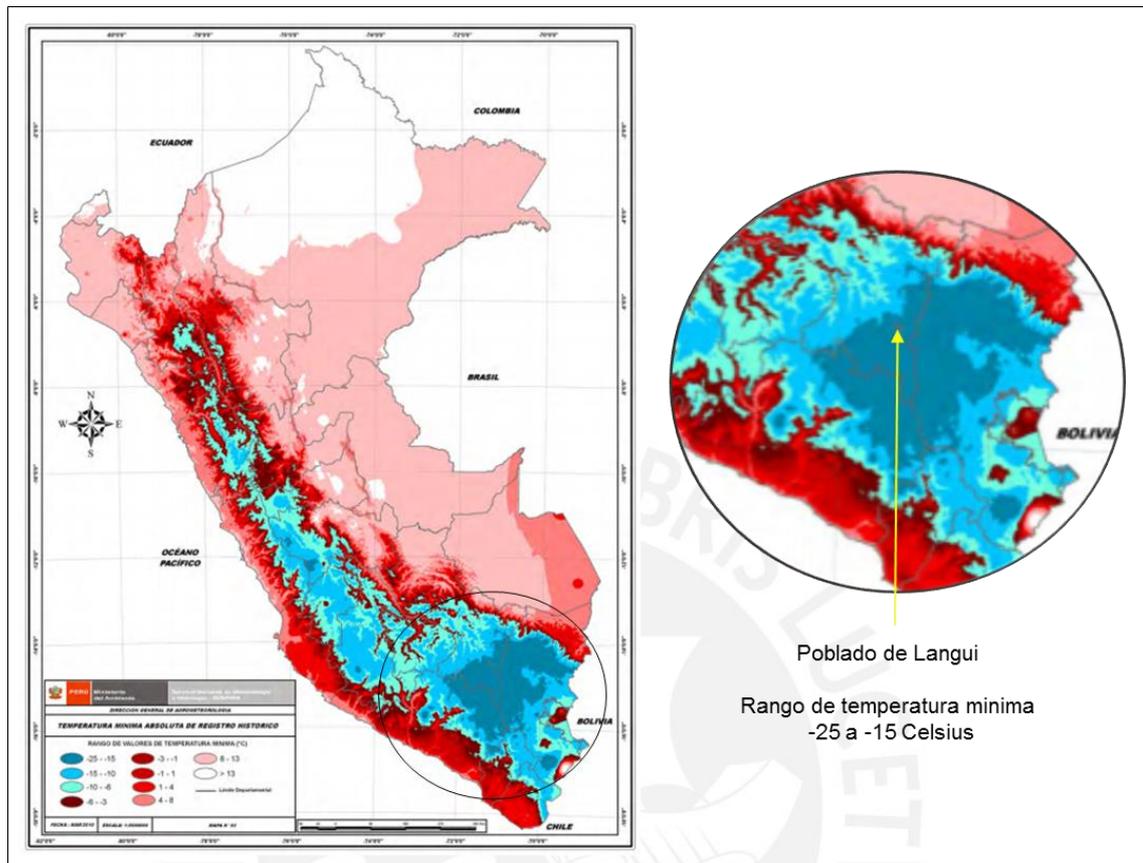


Figura 1.5.1. - Mapa de Temperatura mínima absoluta registro histórico – fuente Atlas de heladas del Perú - SENAMHI

Al analizar la ubicación específica de Langui encontramos que se encuentra en el rango de temperaturas mínimas de 15 a 25 grados bajo cero Celsius. Estas temperaturas proponen que esta zona del sur del país goce de nuestros esfuerzos para lograr mitigar la falta de confort térmico. Asimismo, es importante reconocer que las bajas temperaturas se presentan en una franja muy extensa del territorio nacional, por lo que, se debe considerar como una exigencia de la tesis, que la tecnología brinde la posibilidad de replicar la misma bajo condiciones similares.

La criticidad de un problema social no solo recae en la severidad o el impacto que puede manifestarse sino en la frecuencia con la que el evento puede o se repetirá en caso se trate de un evento predecible. Por esta razón, es que se recurre al siguiente mapa del SENAMHI, en donde se presenta la cantidad de días al año que se producen las heladas en nuestro territorio.

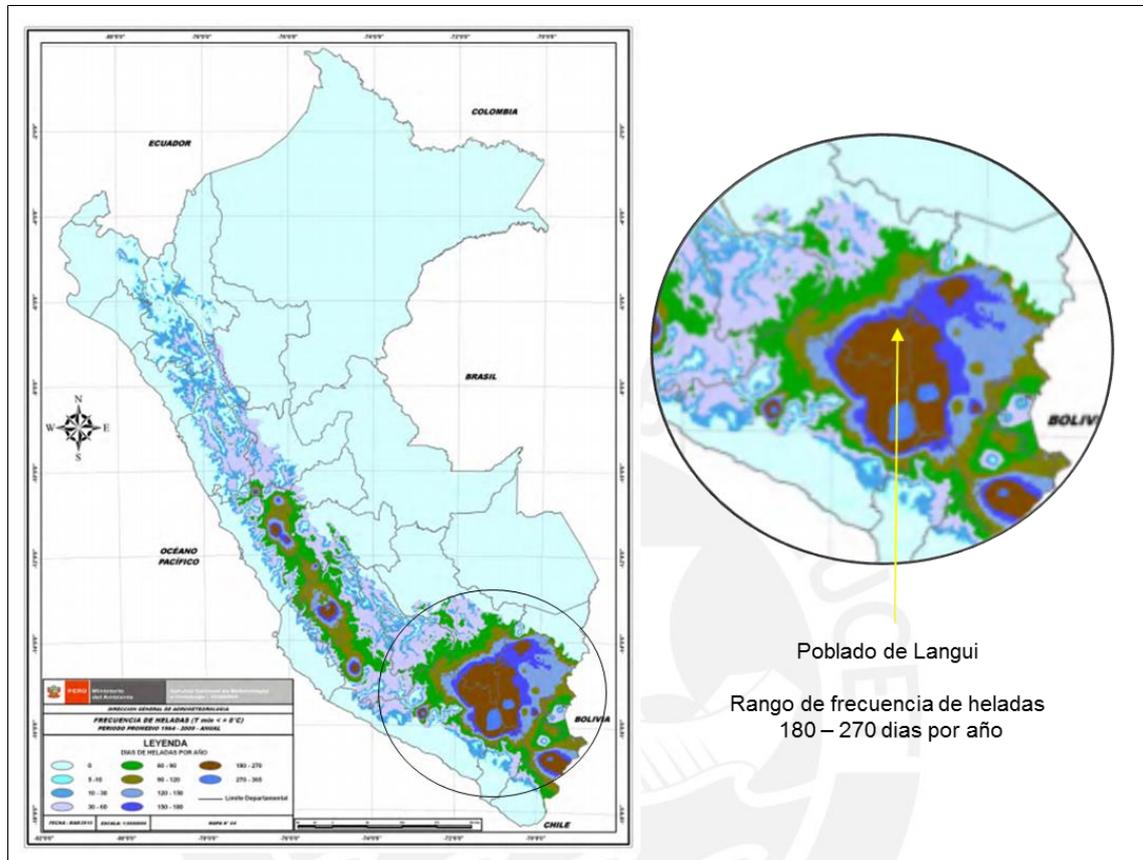


Figura 1.5.2. -Frecuencia de Heladas Temperatura menor igual a cero grados Celsius – fuente Atlas de heladas del Perú - SENAMHI

De la información estadística recogida por la agencia gubernamental, es que podemos concluir que en el caso de Langui y sus alrededores existe tanto una severidad muy alta en las condiciones climatológicas, así como, frecuencia de recurrencia sumamente elevada, por lo que, el desarrollo de una solución tecnológica queda sumamente justificado.

Luego de identificar este grave problema es que se requiere conocer de una manera más exacta las condiciones de temperatura, información de carácter público que se encuentra en el portal web del SENAMHI. Al acceder a esta base de datos históricos de medición de temperaturas en la región, se pudo conocer las condiciones de temperatura en los meses donde las heladas eran más frecuentes y más severas:

Tabla 1.5.1. - Resumen de temperaturas de los meses con mayor registro de heladas.

	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Mínimo Mensual
MAYO			
Temperatura Máxima registrada	14.07	21.20	7.70
Temperatura promedio registrada	9.02	19.92	-0.21
Temperatura mínima registrada	6.47	16.80	-5.50
JUNIO			
Temperatura Máxima registrada	9.59	21.80	1.60
Temperatura promedio registrada	6.86	18.38	-3.31
Temperatura mínima registrada	4.37	11.60	-7.30
JULIO			
Temperatura Máxima registrada	9.30	20.10	2.10
Temperatura promedio registrada	7.06	17.34	-2.76
Temperatura mínima registrada	4.74	10.00	-7.60
AGOSTO			
Temperatura Máxima registrada	11.31	21.00	4.20
Temperatura promedio registrada	8.80	19.28	-1.35
Temperatura mínima registrada	6.17	15.00	-6.80
SEPTIEMBRE			
Temperatura Máxima registrada	12.33	21.50	6.90
Temperatura promedio registrada	10.59	18.99	3.47
Temperatura mínima registrada	8.65	15.10	-2.80

La Tabla 1.5.1., muestra el resumen de la información histórica que se ha podido recopilar sobre las temperaturas de la zona. Es sumamente importante contar con esta información para poder resolver el problema de confort.

1.6 Recurso solar

Ante las bajas temperaturas debemos buscar alternativas para poder mejorar de manera sostenible la calidad de vida de los pobladores de la región razón por la cual realizamos un análisis del recurso solar disponible.

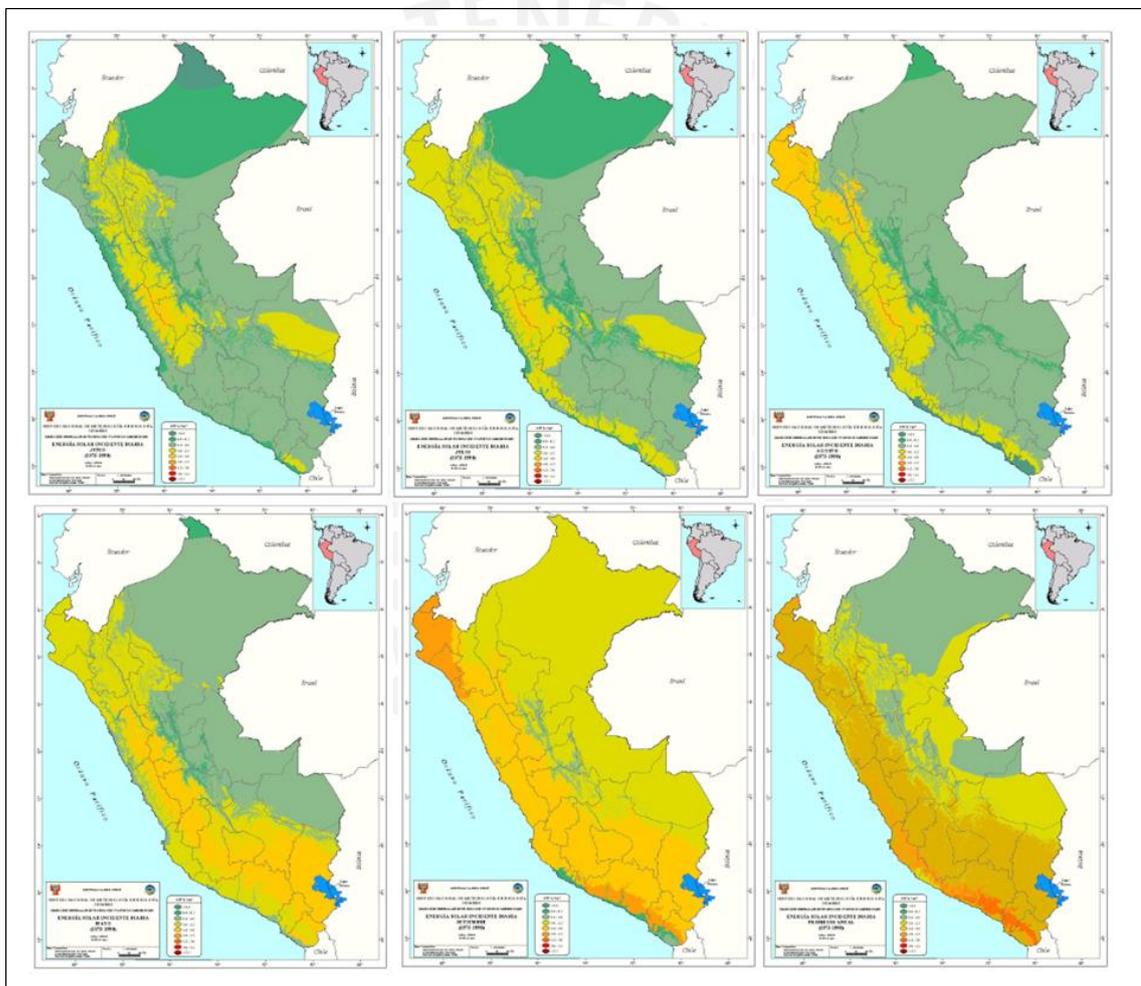


Figura 1.6.1. -Mapas del Recurso Solar en el Perú para los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y el promedio anual. – Fuente SENAMHI Atlas Solar

Es importante considerar tanto el promedio anual como los meses seleccionados, ya que, del análisis de las heladas históricas hemos podido apreciar que la localidad de

Langui presenta condiciones frías por más de la mitad del año, por lo que, el promedio anual nos permitirá satisfacer dicho requerimiento, asimismo, es crucial conocer el recurso solar en los meses de menor temperatura, ya que, estos presentan mayor severidad sobre las condiciones de confort térmico. En el mismo documento presentado por el SENAMHI se pueden apreciar mapas específicos para la región del Cusco para los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre, lo cual nos permite tener una distribución más exacta del recurso.

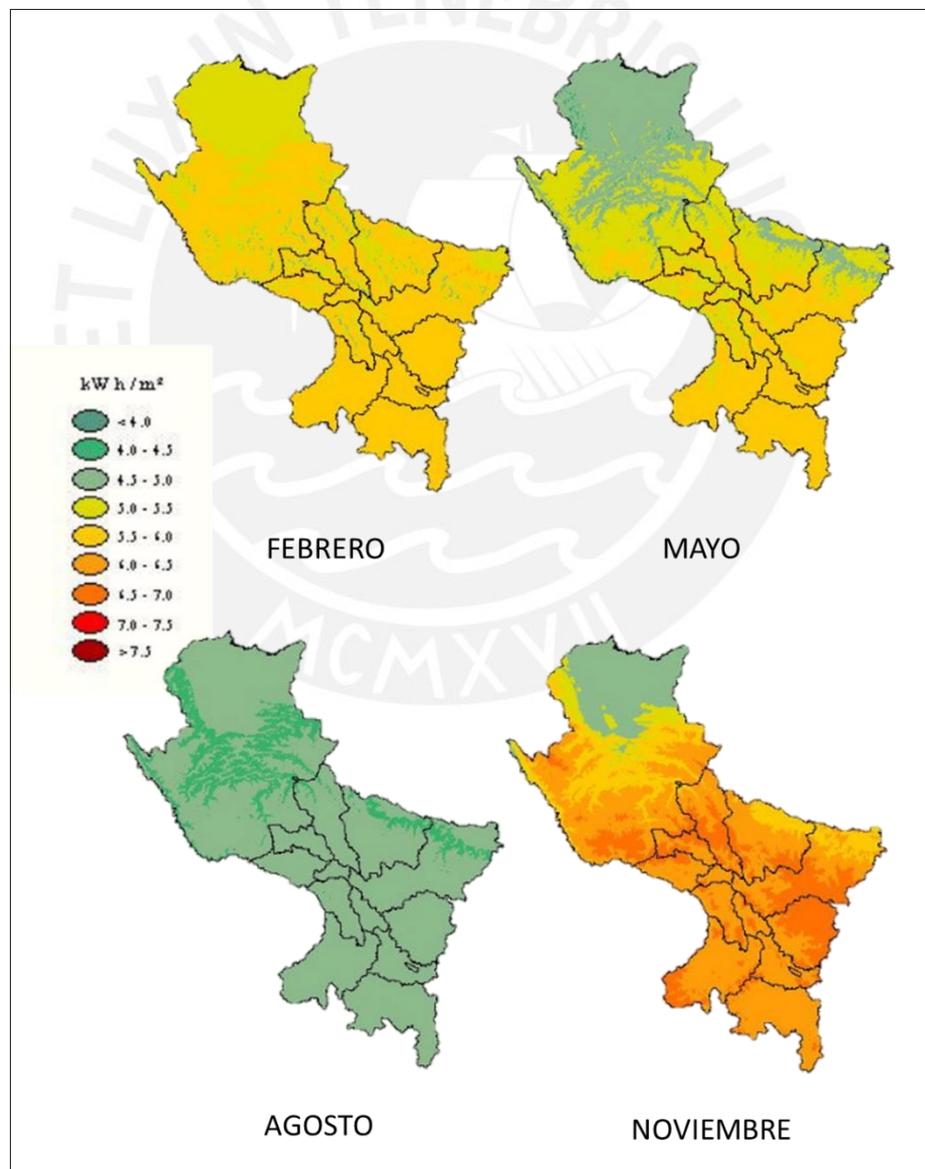


Figura 1.6.2. Mapa de Recurso Solar para la región Cusco – Fuente SENAMHI Atlas Solar

Del análisis realizado podemos identificar que para la ubicación del poblado de Langui los valores promedio de irradiación diaria sobre una superficie horizontal en los meses de menor temperatura, mayo a septiembre, varían entre 4.5 – 7 kWh.

Al revisar la información sobre el recurso solar, es que, consideramos que esta fuente podría ser aprovechada con la finalidad de mejorar las condiciones térmicas de la posta de salud, así como, de las casas de los pobladores de la zona.



CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

Un sistema de calefacción solar tiene como objetivo aprovechar la energía proveniente del sol para elevar la temperatura de un objeto determinado.

2.1 La energía solar

La energía proveniente del Sol es generada por las constantes reacciones nucleares de fusión que se originan en el astro. El tamaño del Sol es de 1.39×10^9 metros y se encuentra a una distancia promedio de 1.5×10^{11} metros de la tierra. A pesar de esta gran distancia el Sol nos proporciona de una gran cantidad de energía producto de las reacciones, una gran cantidad de energía es irradiada y transportada en forma de partículas electromagnéticas llamadas fotones.

La constante solar, G_{sc} , se define como el valor de la energía disponible por unidad de tiempo y área sobre una superficie perpendicular en las afueras de la atmósfera, calculada a la distancia media entre el sol y la tierra. Su valor medio constante es de 1.353 W/m^2 , este valor varía con la distancia entre el sol y la superficie receptora; dicha

distancia es ampliamente modificada por la órbita elíptica de la tierra, lo cual genera que la constante fluctúe entre 1.308 y 1.395 W/m² aproximadamente. Dependiendo del día del año (n) la radiación solar directa disponible extraterrestre variará de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

$$G_{on} = \quad (2.1.1a)$$

$$\left(G_{sc} \left[\begin{array}{l} 1.000110 + 0.034221 \cos B + 0.001280B \\ + 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B \end{array} \right] \right)$$

$$(2.1.1b)$$

Donde:

G_{sc} : Constante solar, su valor medio es de 1,353 W/m² o 4.92 MJ/m² h.

G_{on} : Irradiación extraterrestre para el enésimo día del año, sobre el plano normal a la irradiación solar.

n : Enésimo día del año.

Asimismo B está dado en función del enésimo día del año por la fórmula.

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.1.2)$$

Radiación e Irradiación

Los términos radiación e irradiación corresponden al cuerpo que radia la energía y al cuerpo expuesto respectivamente; ambos corresponden a la energía electromagnética que radia de un cuerpo. Es común que se utilice el término radiación para referirse a la irradiación y viceversa. A continuación, se definen los términos considerando la referencia en la tierra.

Irradiación solar directa

Es aquella radiación proveniente del sol que llega a la tierra sin presentar cambios en su dirección.

Irradiación solar difusa

Radiación solar recibida que presenta cambios en su dirección original, principalmente se trata de radiación reflejada por la atmósfera o cuerpos de nubes.

Irradiancia

Corresponde a la potencia solar recibida por una superficie por unidad de área.

2.2 Ángulos importantes en energía solar**Latitud de la ubicación geográfica, ϕ**

Ángulo utilizado como referencia geográfica que indica la posición relativa en los hemisferios norte y sur con relación al ecuador, varía entre -90° y 90° correspondiendo los valores positivos al norte.

Declinación solar, δ

Ángulo que se genera entre la ubicación del sol y el plano del ecuador al medio día, varía entre -23.45° y 23.45° , siendo el norte positivo. Es importante mencionar que para ubicaciones tropicales cuando la latitud y la declinación tienen el mismo valor, la radiación solar incide perpendicularmente a la superficie terrestre.

Ángulo horario ω

Ángulo que corresponde al desplazamiento relativo entre el sol y la tierra por la rotación de esta última. Se considera una desviación de 15° por hora en relación al medio día solar, se otorga valores negativos a las horas de la mañana.

Inclinación de la superficie, β

Corresponde al ángulo entre el plano correspondiente a la superficie en análisis y la horizontal, técnicamente puede variar entre 0 y 180 grados, considerando que para inclinaciones mayores a 90° la superficie se encuentra orientada hacia el suelo.

Azimut solar γ_s

Es el ángulo que se mide sobre la proyección de la posición del sol en el plano horizontal desde la línea correspondiente al sur de valor 0 con el este negativo dentro del rango de -180 a 180 grados.

Azimut de la superficie γ

Orientación de la superficie respecto de la línea correspondiente al sur de valor 0 con el este negativo dentro del rango de -180 a 180 grados.

Zenith solar θ_z

Corresponde al ángulo que se genera entre la línea vertical y la línea al sol, es equivalente al ángulo de incidencia de una superficie plana.

Ángulo de incidencia θ

Es aquel ángulo que se genera entre la dirección de la radiación solar directa y la normal a la superficie.

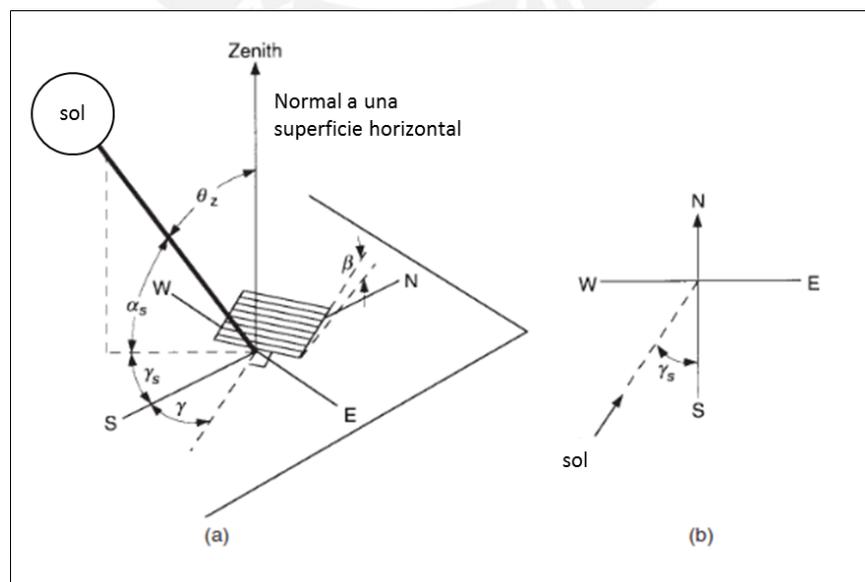


Figura 2.2.1. – Adaptación de Solar Engineering Thermal Processes (Duffie y Beckman 2013)

2.3 Longitudes de onda y sus características principales

Las diferentes radiaciones solares dan origen al espectro solar, el cual es distribuido según la longitud de onda, 47% radiación visible, 46% radiación infrarroja y 7% radiación ultravioleta. Estas longitudes de ondas son sumamente importantes debido a sus características. En el caso de los materiales transparentes estos dejarán atravesar una gran parte de la irradiación recibida, mientras que, la radiación proveniente del interior del colector no podrá atravesar al objeto transparente por tener una longitud de onda larga. Al no poder escapar del sistema la energía será absorbida por el mismo, con lo cual la energía será aprovechada por nuestro sistema.

Tabla 2.3.1. - Resumen espectro electromagnético vs. Longitud de onda y energía disponible

Parámetros	Visible	Infrarroja	Ultravioleta
Long. Onda (mm)	<0.38	0.38-0.78	>0.78
w/m ²	640	618	95
% de energía	47	46	7

El comportamiento diferenciado para las diversas longitudes de onda permite elevar la temperatura de un sistema, puesto que, se conoce que los materiales transparentes permiten el ingreso de determinadas longitudes pero al entrar en contacto la radiación con un cuerpo dentro del sistema este cuerpo reflejará la radiación en una longitud de onda diferente, generando que el cristal se comporte como un material opaco para la nueva longitud y que la energía se mantenga dentro del sistema.

Para poder aprovechar la energía solar recibida por un cuerpo es necesario conocer algunos fundamentos básicos de la transferencia de calor.

2.4 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor se puede producir mediante tres mecanismos, los cuales presentan características únicas, pueden ser aprovechadas a nuestro favor y otras que deben ser previstas para garantizar el correcto funcionamiento de nuestros sistemas.

Conducción

Es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica que se produce por la actividad molecular de la materia. Debido al movimiento molecular se generan choques entre las moléculas produciéndose una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas, produciéndose así, un flujo de calor de las temperaturas más elevadas (mayor movimiento molecular) a las más bajas. La fórmula para determinar el flujo de calor por conducción es:

$$q_{cond} = \frac{Q_{cond}}{A_s} = \frac{k(T_2 - T_1)}{L}$$

Donde

(2.4.1)

q_{cond} : Flujo de calor por conducción por unidad de área [W/m²].

Q_{cond} : Calor transmitido por conducción [W].

A_s : Área de la superficie en m².

k : Conductividad térmica del material [W/mK].

T_1 : Temperatura de la superficie en el punto 1 [K].

T_2 : Temperatura de la superficie en el punto 2 [K].

L : Longitud por la cual se genera la transferencia de calor [m].

Convección

Se producen por medio de un fluido que puede encontrarse en estado gaseoso o líquido. La transferencia de calor por convección puede describirse como la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a la combinación de los efectos de la conducción y el movimiento global del fluido. Generalmente se consideran los intercambios de energía sensible es decir no existe cambio de fase en la materia sin embargo existen casos donde se produce el cambio de fase por lo que en esos casos deberá considerarse las particularidades adicionales que se presentan. La fórmula para determinar el flujo de calor de convección es:

$$q_{conv} = \frac{Q_{conv}}{A_s} = h_{conv}(T_s - T_{\infty})$$

Donde

(2.4.2)

q_{conv} : Flujo de calor por convección por unidad de área [W/m^2].

Q_{conv} : Calor transmitido por convección [W].

A_s : Área de la superficie en [m^2].

h_{conv} : Coeficiente de convección [W/mK].

T_s : Temperatura de la superficie [K].

T_{∞} : Temperatura infinita del fluido [K].

A continuación presentamos una tabla de valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Tabla 2.4.1. – Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Proceso	h_{conv} [W/m ² K]
Convección libre	
Gases	2 - 25
Líquidos	50 - 1,000
Convección Forzada	
Gases	25 - 250
Líquidos	50 - 20,000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2,500 – 100,000

Radiación térmica

La radiación corresponde a la energía que es emitida por la materia al encontrarse a una temperatura finita determinada. Esta energía es transportada por ondas electromagnéticas, por lo que, a diferencia de los procesos de conducción y convección no requiere un medio material para realizar la transferencia. En ese sentido es que la radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío. A continuación, se presentarán algunos conceptos básicos relacionados a la radiación térmica, ya que, serán necesarios para el desarrollo de los cálculos.

Emisividad

Es una propiedad radiativa de las superficies cuyos valores se encuentran en el rango de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, debido a que, su valor es en referencia a la emisividad de un cuerpo negro a la misma temperatura que toma el valor de 1. La potencia emisiva de un material es:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Donde (2.4.3)

E : Potencia emisiva de la superficie [W/m²].

ε : Emisividad de la superficie [Adimensional].

σ : Constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es 5.67×10^{-8} [W/m² K⁴].

T_s : Temperatura de la superficie [K].

Absorción, reflexión y transmisión en superficies

Es importante considerar que en los procesos de radiación térmica de las máquinas que aprovechan el recurso solar, se producen simultáneamente procesos de absorción, reflexión y transmisión como se muestra en la figura.

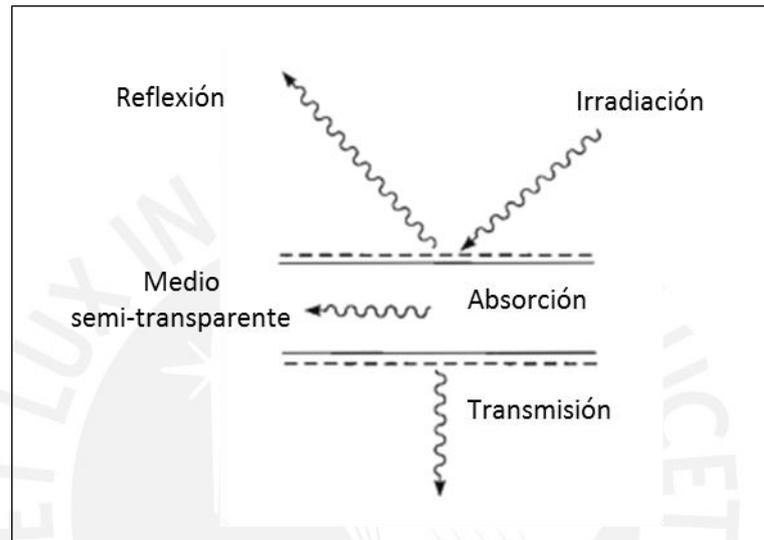


Figura 2.4.2. – Reflexión, absorción y transmisión adaptación de Fundamentos de transferencia de calor (Incropera Dewitt 1996).

Absortividad

Propiedad radiativa de las superficies, cuyos valores se encuentran en el rango de $0 \leq \alpha \leq 1$, debido a que, su valor nos indica la proporción de irradiación absorbida por la superficie en relación a la irradiación recibida.

Reflectividad

Propiedad que determina la fracción de la irradiación reflejada en relación a la irradiación recibida por una superficie, el rango de valores que recibe es $0 \leq \rho \leq 1$.

Transmisividad

Propiedad que determina la fracción de irradiación transmitida por un medio y la irradiación recibida por una superficie, el rango de valores que recibe es $0 \leq \tau \leq 1$.

La conservación de la energía para un volumen de control

La ley de la conservación de la energía, indica que, la misma no se crea ni se destruye, únicamente se transforma en otros tipos de energía. Para lo cual, si lo aplicamos a un volumen de control tendremos la siguiente afirmación, la suma de la energía que ingresa (térmica y mecánica) al volumen de control y la energía que se genere dentro del sistema, menos la suma de la energía que sale del volumen de control será igual al incremento de energía almacenada en el sistema.

$$E_{ing} + E_g - E_{sal} = \Delta E_{alm}$$

Donde (2.4.4)

E_{ing} : Energía que ingresa al sistema [kWh].

E_g : Energía que se genera en el sistema [kWh].

E_{sal} : Energía que sale del sistema [kWh].

ΔE_{alm} : Variación en la energía almacenada en el sistema [kWh].

En la aplicación de un sistema de calefacción en el cual no existe generación interna de energía, es decir $E_g = 0$, tendremos la siguiente ecuación general.

$$E_{solar} - E_{perd} = E_{útil}$$

Donde (2.4.5)

E_{solar} : Energía solar disponible [kWh].

E_{perd} : Energía pérdida por el sistema [kWh].

$E_{útil}$: Energía útil o aprovechada por el sistema [kWh].

2.5 Confort térmico

Se define como confort térmico, al estado en que los individuos no experimentan sensación de frío ni calor, es decir, un ambiente agradable desde el punto de vista térmico. El análisis del confort térmico es muy complejo debido a tratarse de una sensación de los individuos, sin embargo, el confort térmico tiene la característica de presentarse en los momentos en los cuales la temperatura corporal varía dentro de un pequeño intervalo y la humedad en la piel es baja.



CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, existen diferentes sistemas que aprovechan la energía solar, la mayoría de estos sistemas se utilizan para el aumento en la temperatura del agua sanitaria de las residencias, algunas tecnologías cuentan con aporte de la energía térmica solar para la calefacción de las habitaciones, sin embargo, esta aplicación se restringe a sistemas complementarios a un sistema de calefacción principal por lo general a gas o electricidad. Asimismo, en la actualidad se ha generado una tendencia al uso de sistemas similares a los de agua sanitaria para el calentamiento del aire en las habitaciones, sin embargo la tecnología existente no ha logrado generar su uso de manera habitual en nuestro país. Es por esta razón que se estudiarán los diferentes sistemas existentes con la finalidad de poder idear un sistema más acorde a las necesidades, capacidades y costumbres peruanas.

En las regiones alto andinas se vienen utilizando sistemas de calefacción solar del tipo muro trombe, los cuales pueden llegar a ser muy eficientes si se realiza un correcto diseño y una instalación apropiada, sin embargo, la instalación de un muro trombe para los pobladores de la zona alto andina es percibida como una instalación de alta complejidad debido a las modificaciones a realizar en las construcciones. Asimismo, este tipo de instalaciones requiere de una orientación especial de la edificación por lo que su adaptación en edificios ya construidos puede ser compleja o inviable.

Como una primera distinción de los diferentes sistemas de captación, estos se pueden clasificar en sistemas pasivos y sistemas activos.

Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos se basan en las propiedades termodinámicas de los fluidos para concebir el movimiento de los fluidos, lo cual, les otorga una independencia energética considerable para aplicaciones en las cuales diferentes formas de energía son escasas. Por ejemplo, debido a la dispersión de la población rural en el Perú, existen muchos pobladores que no cuentan con energía eléctrica disponible.

Sistemas activos

Los sistemas activos requieren que los fluidos sean movilizados por diferentes equipos, en caso de trabajar con líquidos se utilizarán bombas y en el caso de trabajar con aire se utilizarán ventiladores. Debido a la necesidad de equipos para el movimiento de los fluidos, estos sistemas no cuentan con una independencia energética.

En la actualidad, los sistemas de calefacción mediante el aprovechamiento de la energía solar cuentan con los siguientes subsistemas:

Subsistema de captación.

Subsistema hidráulico o neumático.

Subsistema de intercambio.

Subsistema de acumulación.

Subsistema de control.

3.1 Subsistema de captación

Es el elemento principal de la instalación, debido a que es el captador de la energía proveniente del sol, su funcionamiento se basa en el principio del efecto invernadero.

3.1.1 Componentes de un sistema de captación

Los sistemas de captación suelen presentar una serie de componentes principales, los cuales procedemos a describir.

Cubierta

Elemento que permite el ingreso de la radiación solar al sistema y que genera el efecto invernadero. La cubierta deberá estar hecha en un material transparente, que permita el ingreso de energía y además que contribuya con la generación del efecto invernadero; al estar expuesta a constantes cambios de temperatura deberá ser resistente a los mismos, así como, presentar una dilatación razonable. Usualmente se utiliza el vidrio templado como cubierta debido a que, reúne las características detalladas anteriormente; sin embargo, existen factores climáticos y sociales a considerar en la elección de los materiales.

Tabla 3.1.1.1 – Propiedades básicas de las cubiertas

Material	Vidrio templado	Polycarbonato	Polimetacrilato
Temperatura máxima °C	200	130	103
Dilatación K ⁻¹	9x10 ⁻⁶	6.8x10 ⁻⁵	8x10 ⁻⁵
Transmisividad	0.83	0.87	0.92
Índice refractario	1.52	1.585	1.49
Vida útil	<100	6	10

Superficie de absorción

Una de sus principales funciones es el de absorber la radiación solar y entregarla al fluido caloportador para su utilización. A continuación, se describen algunos tipos de superficies absorbedoras.

La placa absorbadora, deberá ser de color negro mate, para así, maximizar el aprovechamiento de la radiación. En la actualidad, los principales materiales para la construcción de placa de absorción son el cobre, aluminio, hierro o materiales plásticos. El costo de los mismos obedece al orden de presentación, comúnmente se utilizan dos métodos de transferencia de calor de la placa de absorción al fluido caloportador; el primero consiste, en un flujo tipo serpentín del fluido para recoger el calor; el segundo, en caminos paralelos para el tránsito del fluido.

Los tubos al vacío son una aplicación más elaborada en la cual el sistema consiste de dos tubos concéntricos entre los cuales se ha generado un vacío y el tubo interior cuenta con una película especial para maximizar la absorción; la transferencia al fluido se realiza por el interior del tubo de menor diámetro. El rendimiento de esta tecnología es superior al de las placas de absorción.

Carcasa

Componente que alberga y sostiene el sistema, por lo general se fabrica de madera, fibra de vidrio o metales tales como el aluminio y el hierro. Al momento de la construcción de la carcasa se debe de tomar las precauciones necesarias para que ninguna parte de la placa absorbadora quede expuesta al medio ambiente, debido a que esto causaría grandes fugas de calor. Asimismo, la carcasa deberá contemplar que la misma se encontrará a la intemperie, por lo que, se deberá prever su interacción con las condiciones climáticas de la zona.

Aislante

Para lograr una mayor eficiencia el sistema se deberá mantener lo mejor aislado térmicamente posible del medio ambiente, esto con el fin de minimizar las pérdidas por transferencia de calor al exterior. Los aislantes comúnmente utilizados son la lana de vidrio, el poliestireno, la fibra de vidrio, etc., estos son colocados en la parte inferior del sistema de manera obligatoria y en algunas aplicaciones en las paredes laterales, esto último suele ser prescindible, debido a que, el área lateral suele ser pequeña.

3.1.1.1 Principales tipos de subsistemas de captación

Actualmente los tipos más comunes para la captación de la energía solar térmica son los concentradores y colectores. En la presente nos interesa profundizar en los sistemas de colectores puesto que las temperaturas requeridas son alcanzadas por estos métodos mientras que la aplicación de concentradores se utiliza para altas temperaturas.

Colector solar de placa plana con agua

Son los de mayor uso en la actualidad, la energía solar es absorbida por la placa absorbidora para ser transferida al fluido caloportador. El método de transferencia de la energía al fluido puede ser de diferentes maneras, ya que, las tuberías por donde circula el agua pueden ser soldadas a la placa de manera tangencial, diametral, etc., asimismo, el método de circulación del agua puede ser del tipo serpentín o en tubos paralelos.

Colector solar de placa plana con aire

El fluido caloportador de energía es el aire, el mismo que suele ser propulsado por un ventilador. La aplicación de este tipo de colectores suele utilizarse de manera complementaria a los sistemas de calefacción basados en gas y/o electricidad, así como, para realizar el precalentamiento del aire para procesos de secados de materiales.

3.2 Subsistema hidráulico o neumático

Este subsistema corresponde ya sea al sistema de tuberías o ductos que se utilizarán para canalizar el fluido caloportador. Las aplicaciones más comunes para el caso de agua son serpentines o tubos en paralelo. En el caso de sistemas neumáticos las aplicaciones más comunes se presentan a continuación mediante las vistas de sección indicando la dirección del flujo de aire, la cantidad de cubiertas transparentes y los sistemas de ductos.

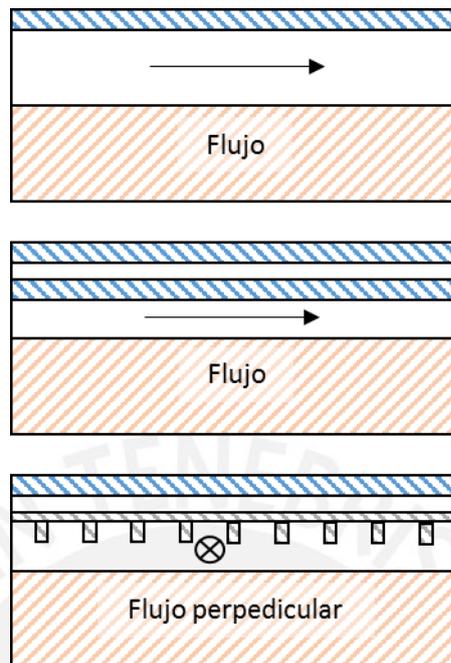


Figura 3.2.1. – Sistema de ductos más comunes en colectores de aire.

3.3 Subsistema de intercambio

En este subsistema se realiza una transferencia de calor entre el fluido especializado y otro fluido, el cual será utilizado como producto final del sistema. El caso más común es una terma solar donde el fluido presente en el subsistema hidráulico es un líquido no consumible por el ser humano como agua aditivada con anticongelantes para una aplicación en zonas frías donde se busca calentar agua sanitaria para el uso doméstico. Los sistemas de intercambio pueden ser del tipo externo o interno. En el externo el intercambio de calor se realiza fuera del subsistema de acumulación o tanque de la terma y en el interno, se realiza dentro del tanque o subsistema de acumulación.

3.4 Subsistema de acumulación

Al aprovecharse una energía disponible de manera interrumpida aparece la necesidad de poder acumular energía para su disposición en momento donde la radiación solar no es aprovechable. Existen diferentes mecanismos de acumulación de calor los cuales aprovechan las características de los materiales y las propiedades de diferentes materiales para la acumulación de energía, para ser liberada durante la ausencia solar. Existen aplicaciones como la terma solar donde el agua sanitaria a utilizarse es calentada durante la presencia de radiación y debido a las características del tanque de acumulación y las propiedades del agua se logra mantener la temperatura adecuada por un intervalo de tiempo razonable. Existen otros mecanismos de acumulación tales como los lechos de piedras en los cuales se aprovecha la energía solar para elevar la temperatura de las piedras de manera que durante los periodos de ausencia solar las piedras liberan la energía almacenada durante el día, la cual, es transportada por el fluido caloportador hacia su aplicación final.

3.5 Subsistema de control

En algunas aplicaciones es necesaria la presencia de un sistema de control, ya sea, para controlar la temperatura de los fluidos, así como, el funcionamiento de ventiladores o bombas utilizadas para el desplazamiento del fluido.

CAPITULO 4

DISEÑO Y CÁLCULOS

En el presente capítulo se procederán a plantear los requerimientos del proyecto para así poder encontrar la solución óptima al mismo mediante cálculos que nos permitirán elaborar los planos que definan el sistema. Es importante mencionar que al tratarse de un sistema de aprovechamiento solar existirán medidas que afectarán la eficiencia del colector, estas medidas serán identificadas como medidas críticas.

4.1 Lista de exigencias

En concordancia con el objetivo principal de la tesis de eliminar la falta de confort térmico de la posta de salud de Langui, es que, nos permitimos expandir los alcances de la presente a las viviendas de los pobladores de las regiones alto andina, ya que, consideramos que de diseñarse el sistema únicamente para la posta de salud la frecuencia de aprovechamiento de la población objetivo es reducida en comparación con un diseño replicable para implementarse en sus hogares. Es por esta razón, que se extienden las exigencias del sistema para que los pobladores de dicha región puedan elaborarlos, instalarlos y realizar el mantenimiento correspondiente.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto se identifican todas las exigencias que el diseño debe contemplar para considerarse un diseño óptimo.

Tabla 4.1.1. – Lista de Exigencias del Proyecto

SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR PARA LA POSTA DE SALUD DE LANGUI				
EF EM EA D	EXIGENCIAS			P 1-4
	Nº	DENOMINACIONES	DESCRIPCIÓN	
EF	01	Diseño de un sistema de calefacción solar para la posta de salud de Langui	El dimensionamiento del sistema deberá incrementar la temperatura de la habitación a una temperatura confortable.	4
EF	02	Capacidad	El sistema deberá elevar la temperatura del fluido en 10 °C sobre los datos históricos presentados.	3
EF	03	Sistema Económico	El sistema deberá ser lo más económico y técnico posible.	3
EF	04	Instalación.	El sistema deberá poder ser instalado por los pobladores de la región.	2
EF	05	Mantenimiento 01	El mantenimiento deberá ser simple para poder ser realizado por los pobladores.	3
EF	06	Mantenimiento 02	Los componentes que puedan sufrir fallas prematuras deberán de ser accesibles en la región.	3
EF	07	Plazo de entrega	03 de Diciembre del 2015	4
EM	08	Vida útil	Se utilizarán materiales con una vida útil no menor a 05 años.	2
EM	09	Parámetros de selección	Se desarrollará un proceso de selección de sistemas para diferentes habitaciones y ubicaciones geográficas similares.	4
EA	10	Versatilidad	El sistema deberá ser versátil para permitir su sencilla instalación bajo diferentes condiciones.	2
D	11	Estética	Deberá mantener una estética acorde con la población objetivo.	1

De acuerdo con los requerimientos planteados se procede a elaborar la estructura de funciones del proyecto.

4.2 Estructura de funciones de la solución óptima.

La estructura de funciones se inicia con la captación de la radiación solar disponible, esta función la desempeñará la placa de absorción, la cual, aumentará su temperatura con el transcurso del tiempo, para así poder cumplir en simultáneo la siguiente función de transmitir la energía recibida hacia el fluido. El fluido seleccionado es el aire, debido a que, el objetivo es calentar el aire dentro de la posta de salud. El aire, debido a sus propiedades termodinámicas aumentará su temperatura y fluirá naturalmente por el interior de la carcasa, quien, debido a su construcción es la encargada de canalizar el aire de tal manera que se generará una distribución del calor hacia el interior del ambiente. A continuación, la función de almacenamiento será desarrollada por la habitación a calentar. Al funcionar el sistema aproximadamente 11.45 horas diarias en promedio, para los días de los meses entre mayo y septiembre, la energía transmitida a las paredes de la habitación será acumulada por estas para ser liberada por un período limitado de tiempo. La función de refrescar se ha incorporado, debido a que, al tratarse de un centro de salud, el aire debe ser refrescado constantemente, el mismo que se llevará a cabo de manera natural cuando se apertura la puerta de la habitación debido a la presencia de un gradiente de temperatura entre la habitación acondicionada y las habitaciones contiguas.

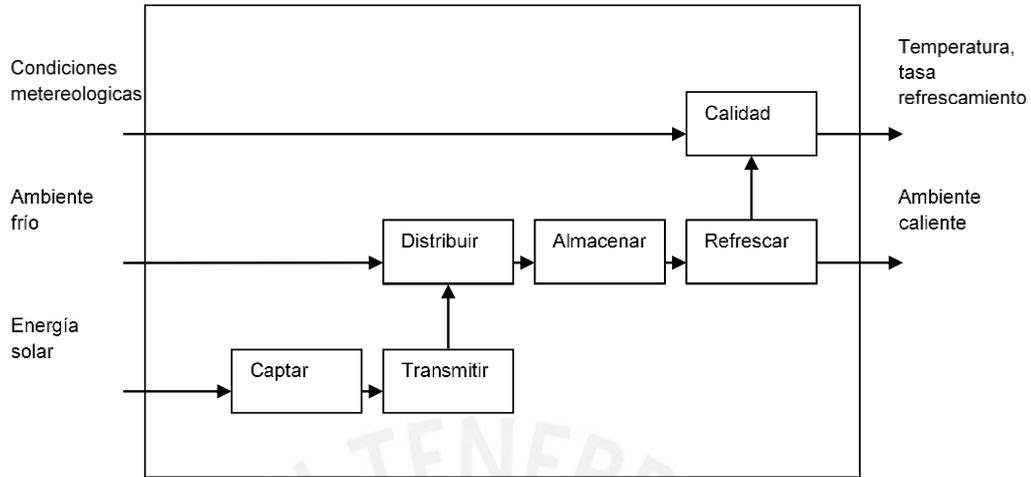


Figura 4.2.1. – Estructura de funciones del sistema

4.3 Matriz Morfológica y proyecto solución óptimo

Tomando como guía la estructura de funciones se procede a proponer diferentes soluciones para cada una de las tareas que debe desarrollar el sistema con la finalidad de poder identificar varias soluciones para el problema.

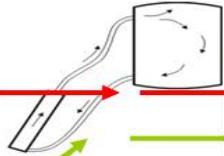
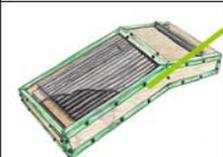
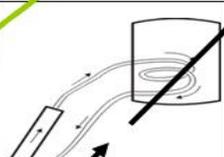
Captar Energía Solar	Transmitir Energía	Distribuir Energía	Almacenar Energía	Refrescar Aire
				NATURALMENTE
				
			NO ALMACENAR	

Figura 4.3.1. – Matriz Morfológica

Del análisis anterior, se desprenden tres opciones viables para el desarrollo de conceptos solución, los cuales serán analizados considerando dos aspectos críticos. El primero, corresponde a un análisis técnico económico de los conceptos propuestos y el segundo, se realiza considerando las exigencias planteadas para el sistema, incluyendo la prioridad establecida en la lista de exigencias para cada una.

Los resultados del análisis técnico económico se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.3.1. – Análisis Técnico Económico de los conceptos solución.

Análisis Técnico - Económico							
Función	Ideal	Solución Roja		Solución Verde		Solución Negra	
Captar Energía Solar	5	Muro Trombe	2	Captador Plano	3	Tubo al Vacío	5
Transmitir Energía	5	Directo	5	Directo	5	Indirecto	3
Distribuir Energía	5	Convección Natural	5	Convección Natural	5	Convección Natural	5
Almacenar Energía	5	Masa Acumuladora	4	No Almacenar	1	Tanque	4
Refrescar Aire	5	Naturalmente	5	Naturalmente	5	Naturalmente	5
Económico	5		3		4		2
Valor Técnico - Económico	30	80%	24	77%	23	80%	24

Del análisis técnico económico, se puede concluir que existe una gran similitud en el rendimiento de las diferentes propuestas; a continuación, se procede al análisis particular de las exigencias de diseño.

Es importante mencionar que las exigencias del sistema se han desarrollado de acuerdo a los objetivos de la tesis y que los valores que se le otorgan a cada campo analizado corresponden a la factibilidad de poder alcanzar la exigencia o deseo correspondiente.

Tabla 4.3.2. – Análisis de exigencias de diseño conceptos solución.

		Descripción	P	Ideal		Roja		Verde		Negra	
EF	1	Incrementar la temperatura de la habitación	4	5	20	5	20	5	20	5	20
EF	2	Elevar 10 grados la temperatura	3	5	15	5	15	5	15	5	15
EF	4	El sistema deberá poder ser instalado por los pobladores de la zona	2	5	10	3	6	5	10	1	2
EF	5	El mantenimiento deberá ser simple para poder ser realizado por los pobladores	3	5	15	3	9	5	15	1	3
EF	6	Los componentes que puedan sufrir fallas prematuras deberán de ser accesibles en la región	3	5	15	5	15	5	15	1	3
EF	7	Entrega Diciembre 15	4	5	20	5	20	5	20	5	20
EM	8	Se utilizarán materiales con una vida útil significativa	2	5	10	2	4	4	8	5	10
EA	10	Sencilla instalación bajo diferentes condiciones	2	5	10	1	2	5	10	3	6
D	11	Deberá mantener una estética acorde con la población objetivo	1	5	5	2	2	3	3	3	3
Valor Exigencias de diseño				Ideal		Roja		Verde		Negra	
				100%	120	78%	93	93%	111	68%	82

Al no haberse obtenido un concepto solución de las evaluaciones anteriores, que se muestran en las tablas 4.3.1 y 4.3.2, es que se procede a realizar un análisis final de los resultados mediante la siguiente gráfica:

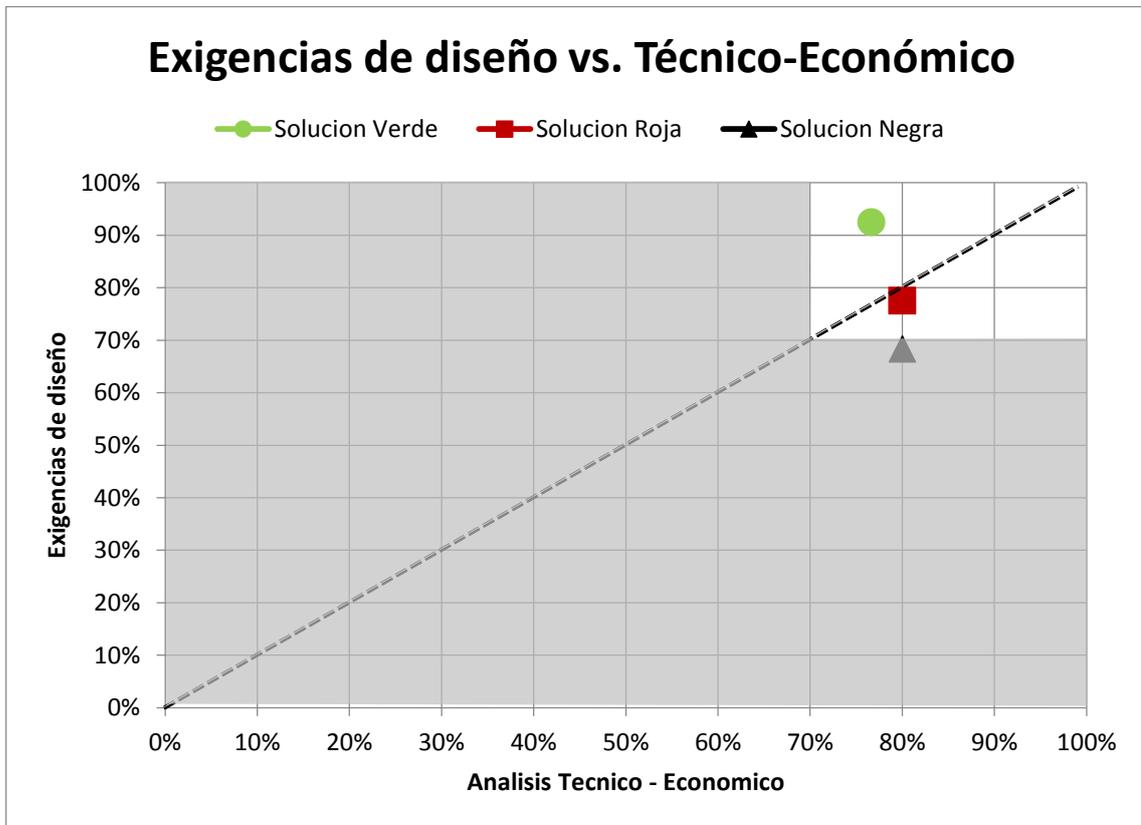


Figura 4.3.1 – Gráfica resultado Exigencias de diseño vs. Técnico – Económico

Del análisis gráfico, únicamente se consideran aquellas soluciones con ambos rendimientos por encima del 70%, luego se traza la línea de equilibrio entre el valor técnico-económico y el valor exigencias de diseño, con la finalidad de analizar dicho equilibrio. De este gráfico, apreciamos que la solución óptima es la solución verde, puesto que, mantiene el mayor índice de cumplimiento de exigencias de diseño +15% y un rendimiento técnico-económico muy similar al de la solución roja, tan solo inferior en 3%.

En conclusión, la alternativa verde es la elegida para el sistema de calefacción de la posta de salud. Al analizar los componentes de dicha solución, se aprecia que tiene como componente principal un colector solar plano el cual será el objeto del diseño en la presente.

Proyecto solución óptimo

El proyecto solución óptimo seleccionado, consiste principalmente de un colector solar plano, que deberá contar con la capacidad de captar la energía solar suficiente para lograr los objetivos de calentamiento planteados, permitir al aire fluir de manera direccionada hacia el interior de la habitación de manera natural y brindar al ambiente seleccionado de la cantidad suficiente de energía, mediante el aire caliente para permitir un mínimo de refrescamiento del aire de la habitación.



Figura 4.3.2– Proyecto solución óptimo – Idea conceptual Grupo de apoyo al sector rural PUCP

4.4 Cálculos

La metodología de cálculo a desarrollar se ha basado en los diferentes procedimientos mostrados por los autores presentados en la bibliografía, de la revisión de estos modelos, es que, se busca plantear una forma sencilla de entender paso a paso la metodología por el objetivo social del presente documento. La metodología, consiste en presentar una fórmula principal y luego determinar cada uno de sus términos mediante

la aplicación de diferentes fórmulas, uso de tablas y gráficas propuestas por diferentes autores.

De acuerdo con el proyecto solución óptimo, tenemos que se trata de un sistema de calefacción solar sin generación de energía interna, por lo que, podemos aplicar la ecuación (2.4.5) correspondiente a la conservación de la energía en la cual tenemos que:

$$E_{solar} - E_{perd} = E_{útil} \quad (4.4.1)$$

La cual podemos apreciar de manera gráfica de la siguiente manera:

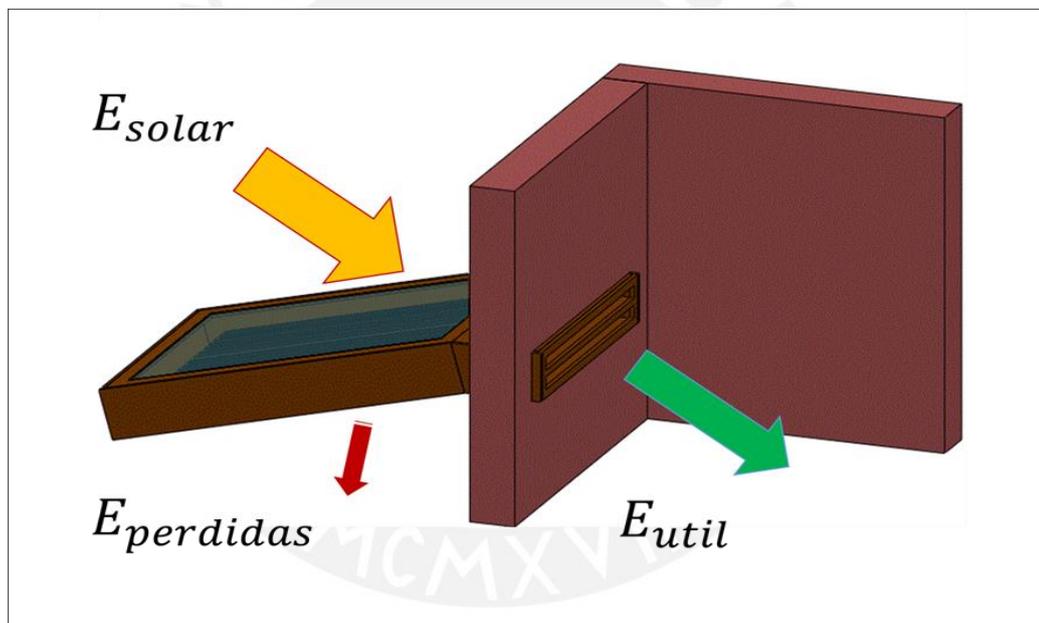


Figura 4.4.1. – Diagrama Energético del colector solar

Asimismo, al aplicar los conceptos de transferencia de calor pertinentes se tiene que la ecuación (4.4.1) es equivalente a:

$$Q_{solar} - Q_{perd} = Q_{útil}$$

Donde (4.4.2)

Q_{solar} : Calor solar disponible [W].

Q_{perd} : Calor cedido como pérdidas por el sistema [W].

$Q_{útil}$: Calor útil o aprovechado por el sistema [W].

Esta ecuación es el punto de partida para nuestro análisis y al considerar las siguientes ecuaciones para el calor solar y el calor cedido tendremos la ecuación (4.1) en función de las características del colector solar plano.

$$Q_{solar} = A_c \times S$$

Y (4.4.3)

$$Q_{perd} = A_c [U_L (T_{pm} - T_a)]$$

Obtenemos (4.4.4)

$$Q_{util} = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)]$$

Donde (4.4.5)

$Q_{útil}$: Calor útil o aprovechado por el sistema [W].

A_c : Área de captación del colector [m²].

S : Irradiación solar absorbida por el colector [W/m²]

U_L : Coeficiente global de pérdidas de transferencia de calor [W/m²K].

T_{pm} : Temperatura media de la placa absorbidora [K].

T_a : Temperatura ambiente [K].

4.4.1 Cálculo del área del colector A_c

El área de captación del colector seleccionado, correspondió a las medidas comerciales de los principales materiales a utilizarse en la construcción del colector. En esta

oportunidad se trabaja con una superficie corrugada metálica para amplificar el área expuesta a la radiación solar y así elevar el rendimiento del sistema.

La oferta comercial viene en longitudes que varían entre 1,800 – 2,400 y 3,600 mm. Asimismo presenta los siguientes espesores.

Tabla 4.4.1.1 – Espesores de calamina convencional

Espesor calamina convencional (mm.)					
0.17	0.20	0.22	0.25	0.27	0.30

La dimensión limitante en el mercado de calaminas es el ancho de la misma, razón por la cual será considerada una medida crítica para nuestro diseño ya que guarda relación con la accesibilidad por parte de los pobladores.

Cálculo del área equivalente de la calamina

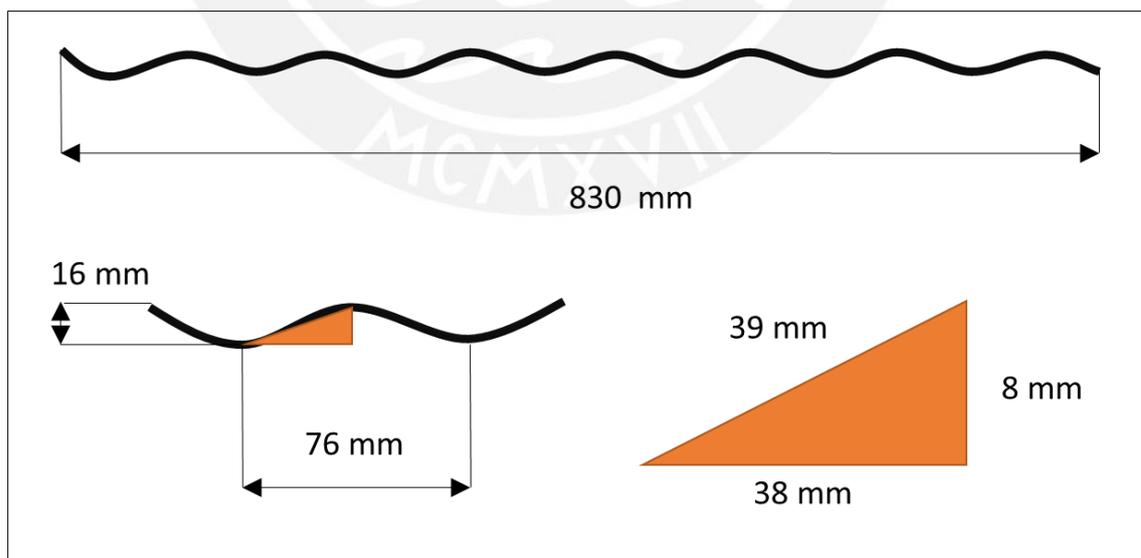


Figura 4.4.1.1. – Cálculo del Área del colector

$$\text{Ancho del colector} = \frac{830}{38} \times 39 = 850 \text{ mm.}$$

$$\text{Longitud del colector} = \frac{1800}{2} = 900 \text{ mm.}$$

$$A_c = 0.765 \text{ m}^2$$

Asimismo, la temperatura ambiente del lugar se estima de la información meteorológica histórica, por lo que, se considera conocida.

Los otros tres términos son incógnitas que se hallan mediante la aplicación de otras fórmulas, en primer lugar, se buscará hallar el término referido a la irradiación solar absorbida por el colector.

4.4.2 Cálculo de la irradiancia solar absorbida

La irradiancia absorbida sobre el colector se calcula con la siguiente fórmula:

$$S = G_b R_b (\tau\alpha)_b + G_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g G (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Donde (4.4.2.1)

S : Irradiancia solar absorbida por el colector [W/m²].

G_b : Irradiancia directa, se utiliza el subíndice b correspondiente al término en inglés beam [W/m²].

R_b : Factor geométrico de irradiación directa entre superficies inclinadas y planas [Adimensional].

$(\tau\alpha)_b$: Producto Transmitancia-absortancia directo [Adimensional].

G_d : Irradiancia difusa [W/m²].

$(\tau\alpha)_d$: Producto Transmitancia-absortancia difuso [Adimensional].

ρ_g : Reflectancia del suelo [Adimensional].

G : Irradiancia global [W/m²].

$(\tau\alpha)_g$: Producto Transmitancia-absortancia del suelo [Adimensional].

A continuación, se presentará la forma de despejar los diferentes términos desconocidos de la ecuación.

Cálculo de la irradiación global G , directa G_b y difusa G_d .

Se procederá a calcular los valores de Irradiación directa e Irradiación difusa respectivamente. Para lo cual se procede a calcular la irradiancia en el exterior de la atmósfera, ya que, el proceso de difusión se genera en nuestro planeta. Para ello aplicaremos la ecuación (2.1.a).

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

Donde

G_{sc} : Constante solar que actualmente tiene un valor de 1,367 [W/m²].

G_{on} : Irradiación extraterrestre para el n ésimo día del año sobre el plano normal a la irradiación solar [W/m²].

n : n ésimo día del año [Adimensional].

Para conocer la irradiancia extraterrestre requerimos definir el día que se analizará, por lo que, se considera el día promedio del mes de mayo que corresponde al 15 de ese mes y es el 135 día del año de acuerdo a la tabla 9.

Tabla 4.4.2.1.-Día promedio de irradiación solar mensual

Mes	Valor de n para el i -ésimo día del mes	Día	n
Enero	i	17	17
Febrero	$31 + i$	16	47
Marzo	$59 + i$	16	75
Abril	$90 + i$	15	105
Mayo	$120 + i$	15	135
Junio	$151 + i$	11	162
Julio	$181 + i$	17	198
Agosto	$212 + i$	16	228
Septiembre	$243 + i$	15	258
Octubre	$273 + i$	15	288
Noviembre	$304 + i$	14	318
Diciembre	$334 + i$	10	344

$$G_{on} = 1,367 \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \times 135}{365} \right) = 1,336.15 \text{ W/m}^2$$

Luego de conocer la irradiancia extraterrestre del día en análisis, es importante la ubicación relativa con el Sol, razón por la cual, se utiliza el coseno del ángulo zenith para determinar dicho valor.

$$G_o = G_{on} \cos \theta_z$$

$$Y \quad (4.4.2.2)$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (4.4.2.3)$$

Por lo tanto

$$G_o = G_{on} (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (4.4.2.4)$$

Donde

G_o : Irradiación extraterrestre para el n ésimo día del año sobre una superficie horizontal [W/m²].

ϕ : Latitud de la ubicación geográfica [Grados sexagesimales].

δ : Ángulo de declinación [Grados sexagesimales].

ω : Ángulo horario [Grados sexagesimales].

Los valores del ángulo de la declinación pueden ser hallados con la siguiente fórmula:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

Donde

(4.4.2.5)

δ : Ángulo de declinación solar [Grados sexagesimales].

n : n ésimo día del año [Adimensional].

Con la finalidad de simplificar el análisis, se presenta a continuación una tabla con los valores de la declinación para los días promedio de cada mes.

Tabla 4.4.2.2.-Ángulos de declinación y día promedio mensual.

Mes	Valor de n para el i -ésimo día del mes	Para promedio de los días del Mes		
		Día	n	δ
Enero	i	17	17	-20.9
Febrero	$31 + i$	16	47	-13
Marzo	$59 + i$	16	75	-2.4
Abril	$90 + i$	15	105	9.4
Mayo	$120 + i$	15	135	18.8
Junio	$151 + i$	11	162	23.1
Julio	$181 + i$	17	198	21.2
Agosto	$212 + i$	16	228	13.5
Septiembre	$243 + i$	15	258	2.2
Octubre	$273 + i$	15	288	-9.6
Noviembre	$304 + i$	14	318	-18.9
Diciembre	$334 + i$	10	344	-23

Asimismo el ángulo horario corresponde por definición al valor de 0° al medio día solar y se le restan 15° por hora hacia el amanecer y se le agregan 15° por hora hacia el atardecer. Es importante considerar la existencia de la diferencia entre la hora solar y la hora común, por lo que, introducimos las siguientes ecuaciones.

$$\text{Hora Solar} - \text{Hora estándar} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

Donde (4.4.2.6)

L_{st} : Longitud del meridiano estándar con el cual se determina la hora de la ubicación geográfica [Grados sexagesimales].

L_{loc} : Longitud de la localidad [Grados sexagesimales].

Asimismo

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \operatorname{sen} B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \operatorname{sen} 2B)$$

(4.4.2.7)

El factor B se halla utilizando la ecuación (2.2)

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

Aplicando las ecuaciones (4.4.2.6), (4.4.2.7) y (2.2) obtenemos que para el caso en análisis la Hora Solar será:

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora estándar} + 11 \text{ minutos}$$

Por lo que al calcular el ángulo horario debemos considerar dicha corrección de tiempo, es decir, las 10:19 a.m. reales le corresponderá las 10:30 a.m. en hora solar, para la ubicación de Langui, es importante para el uso de tablas y cálculos que se desarrollarán en la presente tesis, considerar la hora solar.

Para poder determinar el comportamiento del colector solar de manera correcta es que se realizarán los cálculos para diferentes ángulos horarios u horas considerando las siguientes:

Tabla 4.4.2.3. – Ángulos horario a evaluar

Horas antes (-)							Medio día solar	Horas después (+)						
6.5	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5	0	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
98	83	68	53	38	23	8	0	8	23	38	53	68	83	98

Al apreciarse simetría en relación al medio día solar en las próximas tablas se mostrarán los datos de manera abreviada.

Aplicando el valor de $\delta = 18.8^\circ$ correspondiente a mayo y la ecuación (4.4.2.4) podemos calcular la irradiancia por ejemplo para -3.5 horas del mediodía.

$$G_o = 1336.15 (\cos - 14 \cos 18.8 \cos - 53 + \sin - 14 \sin 18.8) = 638.41 \text{ W/m}^2$$

Obteniéndose como resultado la siguiente tabla

Tabla 4.4.2.4. – Cálculo de la Irradiancia sobre superficies planas para diferentes horas.

# Horas	Horas +/- del mediodía solar						
	6.5	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
ω (-am / +pm)	98	83	68	53	38	23	8
θ_z	100	88	74	61	50	40	34
G_o	-	53	361	638	864	1024	1107

No se considera G_o para 6.5 horas del medio día solar, debido a que, la duración del día aproximada es de 11.5 horas, por lo que, para dichos casos el análisis se limitara al considerar el ángulo horario del amanecer u ocaso, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$\cos \omega_s = \cos(-\omega_a) = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta$$

Donde (4.4.2.8)

ω_s : Ángulo horario correspondiente al ocaso, se utiliza el subíndice s correspondiente al término en inglés *sunset* [Grados sexagesimales].

ω_a : Ángulo horario correspondiente al amanecer [Grados sexagesimales].

Al aplicar la latitud y declinación correspondiente obtenemos

$$\omega_s = \text{acos}(-\tan - 14.43 \tan 18.8) = 84.97^\circ$$

Al conocerse este dato es que podemos ajustar nuestro rango de muestreo, conociendo la cantidad de horas de luz solar, recordando que 15° de ángulo horario corresponde a una hora.

Entonces

$$N = \frac{\omega_s}{15} \times 2 = 11.33 \text{ h}$$

Donde

(4.4.2.9)

N : Cantidad de horas de luz solar diaria [h]

Con lo cual tenemos que el amanecer se produce 5.66 horas antes del mediodía.

Tabla 4.4.2.5. – Cálculo de la Irradiancia sobre superficies planas para diferentes horas.

	Horas +/- del mediodía solar						
# Horas	5.7	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
ω (-am / +pm)	84.9	83	68	53	38	23	8
θ_z	89.9	88	74	61	50	40	34
G_o	1.6	53	361	638	864	1024	1107

Es importante precisar que el cálculo viene realizándose con la irradiancia [W/m^2], sin embargo, los datos proporcionados por los mapas solares están dados en [kWh/m^2], por lo que, debemos igualar las unidades para poder continuar nuestro análisis. Por ello debemos recurrir a las definiciones de la Irradiancia e Irradiación para encontrar una equivalencia.

La irradiancia es el valor instantáneo de radiación incidente sobre una superficie mientras que la irradiación es la suma de la radiación solar incidente sobre una superficie en un día completo.

$$\overline{H} \frac{kWh}{m^2} \times \frac{1 \text{ día}}{11.45 \text{ h}} \times \frac{1,000}{k} = H \frac{W}{m^2}$$

(4.4.2.10)

$$5 \frac{kWh}{m^2} \times \frac{1 \text{ día}}{11.45 \text{ h}} \times \frac{1,000}{k} = 436.68 \frac{W}{m^2}$$

A continuación, se debe estimar el coeficiente de claridad (K_t) correspondiente a Langui para continuar con los cálculos del sistema, el cual corresponde a la relación entre la irradiancia promedio extraterrestre y la irradiancia promedio diaria sobre la superficie.

$$K_T = \frac{G}{G_o}$$

Donde (4.4.2.11)

K_T : Índice de claridad [Adimensional].

$$K_T = \frac{G}{\text{Promedio } G_o} = \frac{436.68}{578.59} = 0.75$$

Es al conocer este índice que podremos identificar la proporción de Irradiancia difusa sobre el sistema, lo cual es de suma importancia ya que el aprovechamiento de la energía directa y difusa se realizan de distinta manera. Con la finalidad de poder conocer este ratio es que recurimos a los resultados de los estudios realizados por Erbs en el año 1982, para la irradiación mensual puesto que nuestros mapas nos presentan dicha frecuencia, donde nos presenta las siguientes ecuaciones y la gráfica correspondiente.

Cuando $\omega_s \leq 81.4^\circ$ y $0.3 \leq K_T \leq 0.8$

$$\frac{H_d}{H} = 1.391 - 3.560K_T + 4.189K_T^2 - 2.137K_T^3$$

(4.4.2.12a)

Cuando $\omega_s > 81.4^\circ$ y $0.3 \leq K_T \leq 0.8$

$$\frac{H_d}{H} = 1.311 - 3.022K_T + 3.427K_T^2 - 1.821K_T^3$$

Donde (4.4.2.12b)

H_d : Irradiación mensual difusa [MJ/m^2].

Gráficamente se obtienen las siguientes curvas:

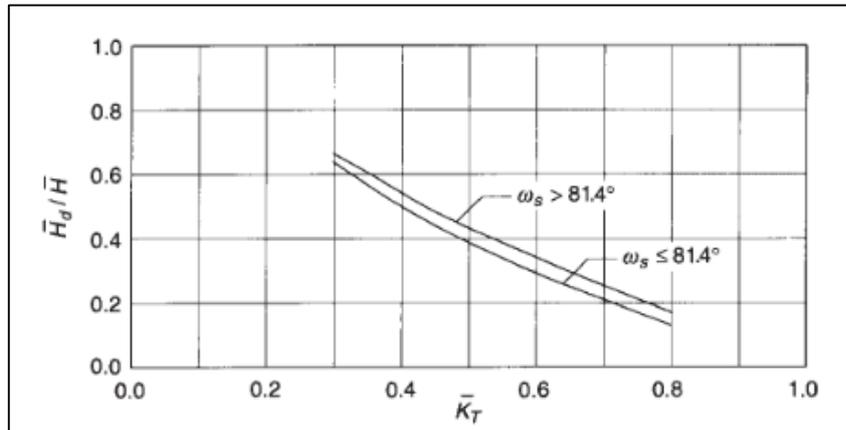


Figura 4.4.2.1. – Ratio de irradiación directa y difusa extraído del libro Engineering of Thermal Processes basado en el estudio de Erbs.

Utilizando la fórmula (4.4.2.12b) por ser ω_s mayor a 81.4 tenemos:

$$\frac{H_d}{H} = 1.311 - 3.022 \times 0.75 + 3.427 \times 0.75^2 - 1.821 \times 0.75^3 = 0.20$$

Al obtener el ratio entre irradiación difusa e irradiación total mensual es que podemos utilizar este mismo ratio para la aplicación instantánea de la irradiancia para lo cual se convirtió la información extraída del mapa solar en Irradiación [kWh/m²] a Irradiancia [W/m²] y se construyó la siguiente gráfica para poder estimar la irradiancia en cualquier momento del día solar. En negro se presentan las líneas de tendencia de los datos.

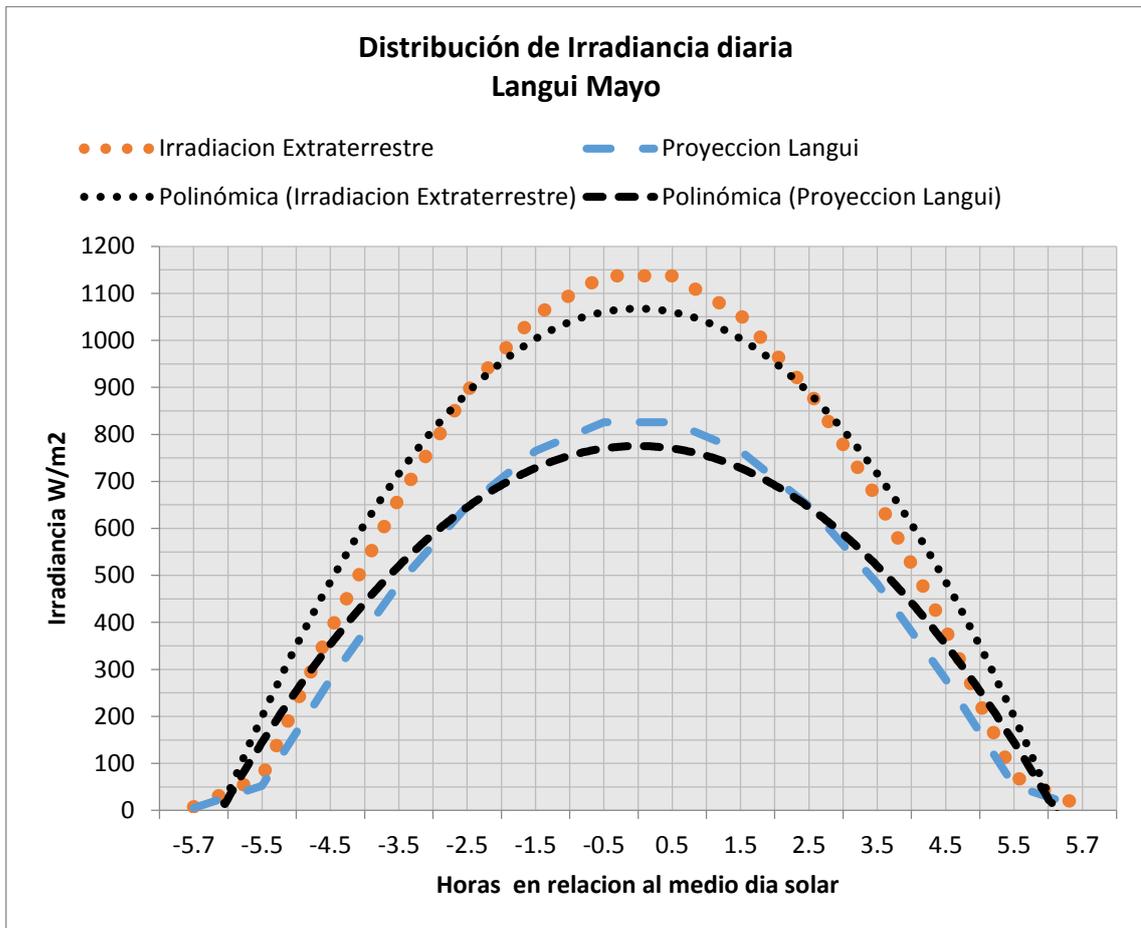


Figura 4.4.2.2. – Distribución de Irradiancia diaria en Langui para el mes de mayo.

Con esta gráfica podemos calcular la irradiancia difusa y directa para cualquier instante del día siguiente, como por ejemplo, para -3.5 horas del mediodía solar tenemos:

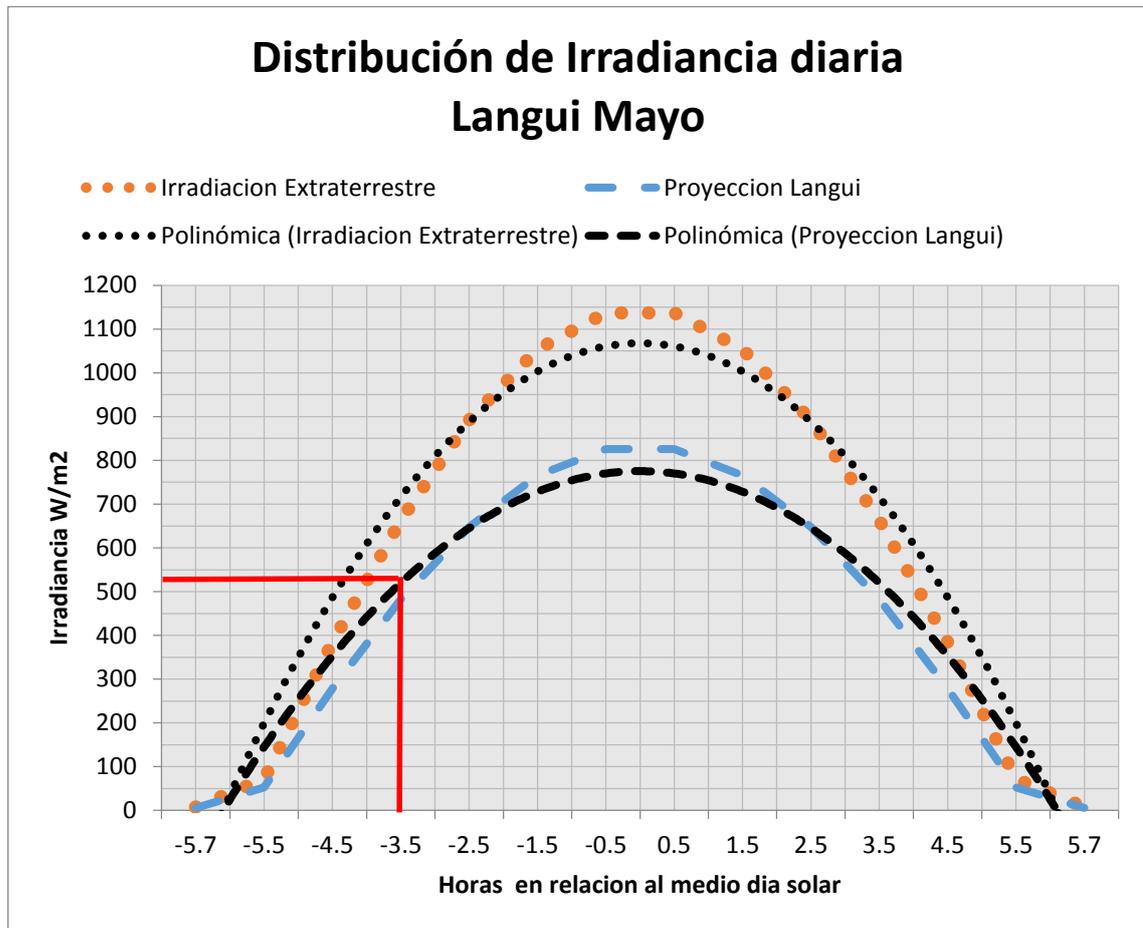


Figura 4.4.2.3. – Cálculo irradiación para -3.5 hora del medio día solar.

De la gráfica tenemos que $G_{-3.5} = 525 \text{ W/m}^2$ y al haber obtenido anteriormente

$$\frac{H_d}{H} = 0.20$$

Tenemos que

$$G_{d-3.5} = 525 \times 0.20 = 104.70 \text{ W/m}^2$$

Asimismo aplicando la siguiente fórmula

$$G = G_b + G_d$$

Donde

(4.4.2.13)

G_b : Irradiación directa [W/m^2].

Obtenemos

$$G_{b-3.5} = 420.30 \text{ W/m}^2$$

De esta manera podemos hallar los valores de irradiancia difusa y directa para los instantes anteriormente analizados

Tabla 4.4.2.6. – Resultados del cálculo de Irradiación global, directa y difusa

Horas del mediodía solar							
Hora	5.7	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
ω (-am / +pm)	84.9	83	68	53	38	23	8
θ_z	89.9	88	74	61	50	40	34
G_o	1.6	53	361	638	864	1024	1107
G	0.1	150	350	525	650	725	875
G_d	0.02	28	71	105	132	148	155
G_b	0.08	112	286	420	530	592	624

Cálculo del Factor geométrico de irradiación directa R_b

Corrige la exposición de una superficie inclinada en relación a una superficie horizontal, el mismo se puede calcular con los ángulos anteriormente mencionados.

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

Donde (4.4.2.14)

θ : Ángulo de incidencia [Grados sexagesimales].

θ_z : Ángulo zenith o de incidencia sobre una superficie horizontal [Grados sexagesimales].

Utilizando esta fórmula R_b es evaluado en un momento determinado, si se desea evaluar en un período de tiempo se debe utilizar la fórmula integrada puesto que la ecuación (4.4.2.14) pierde funcionalidad cuando el amanecer u ocaso suceden a la hora estimada.

$$R_{b,prom} = \frac{a}{b}$$

Donde (4.4.2.15)

$$\begin{aligned}
 a = & (\operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}\phi \cos\beta - \operatorname{sen}\delta \cos\phi \operatorname{sen}\beta \cos\gamma) \times \frac{\pi}{180} \times (\omega_2 - \omega_1) \\
 & + (\cos\delta \cos\phi \cos\beta + \cos\delta \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\beta \cos\gamma) \times (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) \\
 & - (\cos\delta \operatorname{sen}\beta \operatorname{sen}\gamma) \times (\cos\omega_2 - \cos\omega_1)
 \end{aligned}$$

y (4.4.2.16)

$$\begin{aligned}
 b = & (\cos\phi \cos\delta) \times (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\delta \times \frac{\pi}{180} \times (\omega_2 - \omega_1)
 \end{aligned}$$

(4.4.2.17)

Donde los valores de la latitud (ϕ) y la inclinación del colector (β) son conocidos por la ubicación geográfica y las características de diseño. Asimismo, para maximizar la captación del recurso solar el valor de γ es considerado 180 grados.

$$\phi = -14.43$$

$$\beta = 15$$

$$\gamma = 180$$

Siendo ω_1 y ω_2 los valores horarios del período a evaluar, en grados sexagesimales. Por ejemplo, para -3.5 horas del mediodía solar tenemos:

$$\begin{aligned}
 a = & (\operatorname{sen}18.8 \operatorname{sen} - 14.43 \cos 15 - \operatorname{sen}18.8 \cos - 14.43 \operatorname{sen}15 \cos 180) \times \frac{\pi}{180} \times (-37.5 - \\
 & (-52.5)) + (\cos 18.8 \cos - 14.43 \cos 15 + \cos 18.8 \operatorname{sen} - 14.43 \operatorname{sen}15 \cos 180) \times (\sin - \\
 & 37.5 - \sin - 52.5) - (\cos 18.8 \operatorname{sen}15 \operatorname{sen}180) \times (\cos - 37.5 - \cos - 52.5) = 0.176
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b = & (\cos - 14.43 \cos 18.8) \times (\sin - 37.5 - \sin - 52.5) \\
 & + \operatorname{sen}(-14.43) \operatorname{sen}18.8 \times \frac{\pi}{180} \times (-37.5 - (-52.5)) = 0.148
 \end{aligned}$$

$$R_b = \frac{a}{b} = \frac{0.18}{0.15} = 1.18$$

Aplicando el mismo procedimiento para todos los diferentes intervalos de una hora del día solar, los cuales se identificarán con la hora 5.5 para el intervalo entre las 6 y 5 horas y así para cada rango de horas.

Tabla 4.4.2.7. – Resultados del Factor de Irradiación geométrica.

Hora	Horas del mediodía solar						
	5.7	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
$\omega_{1(am),2(pm)}$	85	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
$\omega_{2(am),1(pm)}$	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5	7.5
R_b	5.4	1.58	1.26	1.18	1.15	1.14	1.14

Cálculo de las propiedades ópticas del colector – Transmisividad (τ), Reflexión (ρ) y Absortancia (α).

Los términos ($\tau\alpha$) dependen de las características ópticas de los componentes del sistema, a continuación se realizará el cálculo para hallar los mismos.

Para poder desarrollar estos cálculos es necesario contar con las siguientes propiedades de los materiales:

K : Coeficiente de extinción de la cubierta [m^{-1}].

n : Índice refractario de la cubierta [Adimensional].

L : Espesor de las cubiertas [m].

Para nuestra aplicación utilizaremos 02 cubiertas de Polimetilmetracrilato (PMMA), las cuales presentan las siguientes características:

Tabla 4.4.2.8. – Propiedades ópticas Polimetilmetracrilato (PMMA).

Polimetilmetracrilato (PMMA)	
Coefficiente de extinción	2
Índice refractario	1.49
Espesor	5 mm

Relación entre los índices refractivos y los ángulos de incidencia y de refracción.

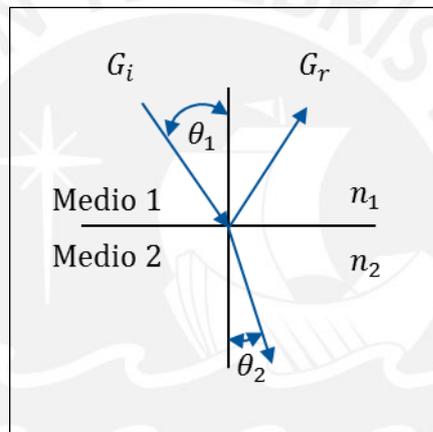


Figura 4.4.2.4.– Relación entre los ángulos de incidencia y refracción, adaptación de engineering of thermal processes.

Relacion de angulos de incidencia y refraccion

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

(4.4.2.18)

El índice refractario del aire se aproxima con la unidad, por lo que, cuando uno de los medios es aire, el valor de $n_{\text{aire}} = 1$, como en nuestro caso. A continuación se calculan las pérdidas por transmisividad, reflexión y absorción siguiendo la metodología que se presenta a continuación y como en el caso anterior al final se presentaran los resultados para todos los momentos en estudio.

Transmisividad

$$\tau = \frac{\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}}{2} \quad (4.4.2.19)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{\tau_a (1 - r_{\perp})^2}{1 - (r_{\perp} \tau_a)^2} = \tau_a \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \left[\frac{1 - r_{\perp}^2}{1 - (r_{\perp} \tau_a)^2} \right] \quad (4.4.2.20a)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{\tau_a (1 - r_{\parallel})^2}{1 - (r_{\parallel} \tau_a)^2} = \tau_a \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} \left[\frac{1 - r_{\parallel}^2}{1 - (r_{\parallel} \tau_a)^2} \right] \quad (4.4.2.20b)$$

Donde

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2 (\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.4.2.21a)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2 (\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.4.2.21b)$$

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (4.4.2.22)$$

$$\tau_a = \frac{I_{\text{transmitida}}}{I_{\text{incidente}}} = \exp \left(- \frac{KL}{\cos \theta_2} \right) \quad (4.4.2.23)$$

Para la cubierta exterior a -3.5 horas del mediodía tenemos

$$\theta_{1c.ext.} = 54.59$$

$$\theta_{2 \text{ c.ext}} = \text{asen} \left(\frac{\text{sen } \theta_1}{n_{\text{pmma}}} \right) = 33.16$$

$$\tau_a = \frac{I_{\text{transmitida}}}{I_{\text{incidente}}} = \exp \left(- \frac{KL}{\cos \theta_2} \right) = \exp \left(- \frac{2 \times 0.005}{\cos 10} \right) = 0.9881$$

$$\begin{aligned} r_{\text{c.ext}} &= \frac{I_r}{I_i} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} = \frac{\left[\frac{\text{sen}^2 (33.16 - 54.59)}{\text{sen}^2 (33.16 + 54.59)} + \frac{\tan^2 (33.16 - 54.59)}{\tan^2 (33.16 + 54.59)} \right]}{2} \\ &= \left[\frac{0.1337 + 0.0002}{2} \right] = 0.0670 \end{aligned}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{0.9881 (1 - 0.1337)^2}{1 - (0.1337 \times 0.9881)^2} = 0.7548$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{0.9881 (1 - 0.0002)^2}{1 - (0.0002 \times 0.9881)^2} = 0.9877$$

$$\tau_{\text{c.ext}} = \frac{0.9092 + 0.9227}{2} = 0.8712$$

Reflexión

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} + r_{\perp} \frac{\tau_a^2 (1 - r_{\perp})^2}{1 - (r_{\perp} \tau_a)^2} = r_{\perp} (1 + \tau_a \tau_{\perp})$$

(4.4.2.24)

$$\rho_{\perp} = 0.2333 \quad \rho_{\parallel} = 0.0005$$

$$\rho_{c.ext} = \frac{0.2333 + 0.0005}{2} = 0.1169$$

Absortancia

$$\alpha_{\perp} = (1 - \tau_a) \left(\frac{1 - r_{\perp}}{1 - r_{\perp} \tau_a} \right)$$

(4.4.2.25)

$$\alpha_{\perp} = 0.0119 \quad \alpha_{\parallel} = 0.0119$$

$$\alpha_{c.ext} = \frac{0.0119 + 0.0119}{2} = 0.0119$$

Para la cubierta interior se realiza el mismo procedimiento, considerando la corrección del ángulo de incidencia, ya que este, será igual al ángulo de refracción.

$$\theta_{1c.int} = \theta_{2c.ext} = 33.16$$

$$\theta_{2c.int2} = a \operatorname{sen} \left(\frac{\operatorname{sen} \theta_{1c.int.}}{n_{pmma}} \right) = 21.54$$

$$\tau_{c.int} = 0.9119$$

$$\rho_{c.int} = 0.0774$$

$$\alpha_{c.int} = 0.0107$$

Luego para un sistema de cubiertas tenemos la siguiente fórmula, para determinar los valores en conjunto:

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_{\perp} + \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_{\parallel} \right]$$

(4.4.2.26)

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\left(\rho_1 \frac{\tau \rho_2 \tau_1}{\tau_2} \right)_{\perp} + \left(\rho_1 + \frac{\tau \rho_2 \tau_1}{\tau_2} \right)_{\parallel} \right]$$

(4.4.2.27)

$$\tau_{2 \text{ cubiertas}} = 0.8077$$

$$\rho_{2 \text{ cubiertas}} = 0.1702$$

$$\alpha_{2 \text{ cubiertas}} = 0.0220$$

Asimismo, se deben hallar los valores para la irradiación difusa y la reflexión del suelo, para lo cual se utilizará la misma metodología considerando los ángulos de incidencia de acuerdo a las ecuaciones o gráfica propuesta por Brandemuehl y Beckman (1980).

$$\theta_{1 \text{ eq.d}} = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2$$

$$\theta_{1 \text{ eq.s}} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2$$

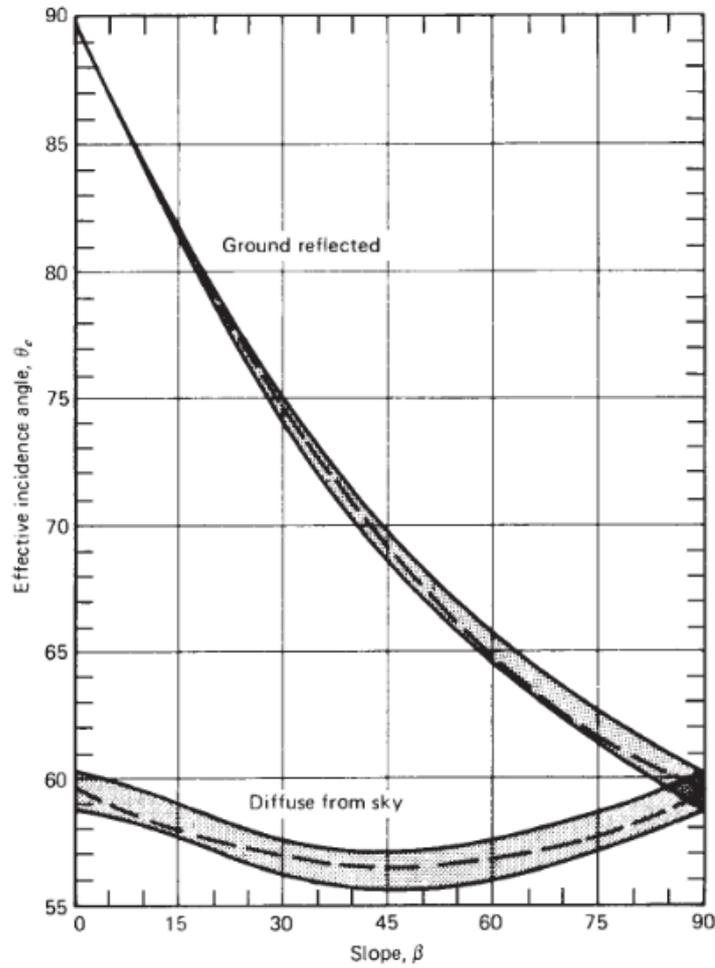


Figura 4.4.2.5.– Ángulo de incidencia efectivo para irradiación difusa y reflexión del suelo extraído de Solar engineering of thermal processes.

$$\tau_d = 0.7665$$

$$\rho_d = 0.2095$$

$$\alpha_d = 0.0239$$

$$\tau_g = 0.2051$$

$$\rho_g = 0.7100$$

$$\alpha_g = 0.0849$$

Al generarse una interacción importante entre la superficie absorbedora y la cubierta del sistema, es necesario evaluar la combinación de la transmitancia/absortancia la cual se define como:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \tag{4.4.2.28}$$

Considerando el valor de absortancia de la placa absorbedora de 0.95 tendríamos:

$$(\tau\alpha)_b = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} = \frac{0.8077 \times 0.95}{1 - (1 - 0.95) \times 0.1702} = 0.8071$$

$$(\tau\alpha)_d = 0.7359$$

$$(\tau\alpha)_s = 0.2021$$

Tabla 4.4.2.9.– Resultados del cálculo de Transmitancia, reflexión y absortividad

Hora	Horas del mediodía solar						
	5.7	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
θ_1	85	83	68	54	41	28	19
θ_2	42	42	39	33	26	19	12
$(\tau\alpha)_b$	0.23	0.33	0.68	0.77	0.80	0.81	0.81
$(\tau\alpha)_d$	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
$(\tau\alpha)_s$	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
ρ_g	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71

Determinación de la Irradiancia

Al conocer estos valores ya podemos calcular la irradiancia para un momento determinado, al contar con todas las variables de las cuales depende, en el caso de 3.5 horas tenemos.

$$S = G_b R_b (\tau\alpha)_b + G_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g G (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$S = 420.30 \times 1.18 \times 0.77 + 104.70 \times 0.74 \times \left(\frac{1 + \cos 15}{2} \right) + 0.71 \times 525 \times 0.2 \left(\frac{1 - \cos 15}{2} \right)$$

$$S = 462.35 \text{ W/m}^2$$

Tabla 4.4.2.10. – Resultados de Irradiancia [W/m²]

Hora	Horas del mediodía solar						
	5.7	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
G	0.1	150	350	525	650	725	875
G_d	0.02	28	71	105	132	148	155
G_b	0.08	112	286	420	530	592	624
R_b	5.4	1.58	1.26	1.18	1.15	1.14	1.14
(τα)_b	0.23	0.33	0.68	0.77	0.80	0.81	0.81
(τα)_d	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
(τα)_s	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
ρ_g	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
S	0	78	296	462	586	652	687

4.4.3 Cálculo del coeficiente de pérdidas de calor del sistema

El esquema de la transferencia de calor consiste principalmente de la energía que ingresa al sistema representada con la flecha de color amarillo, el calor útil representado con la flecha verde y las pérdidas por transferencia de calor superior e inferior representadas con las flechas rojas.

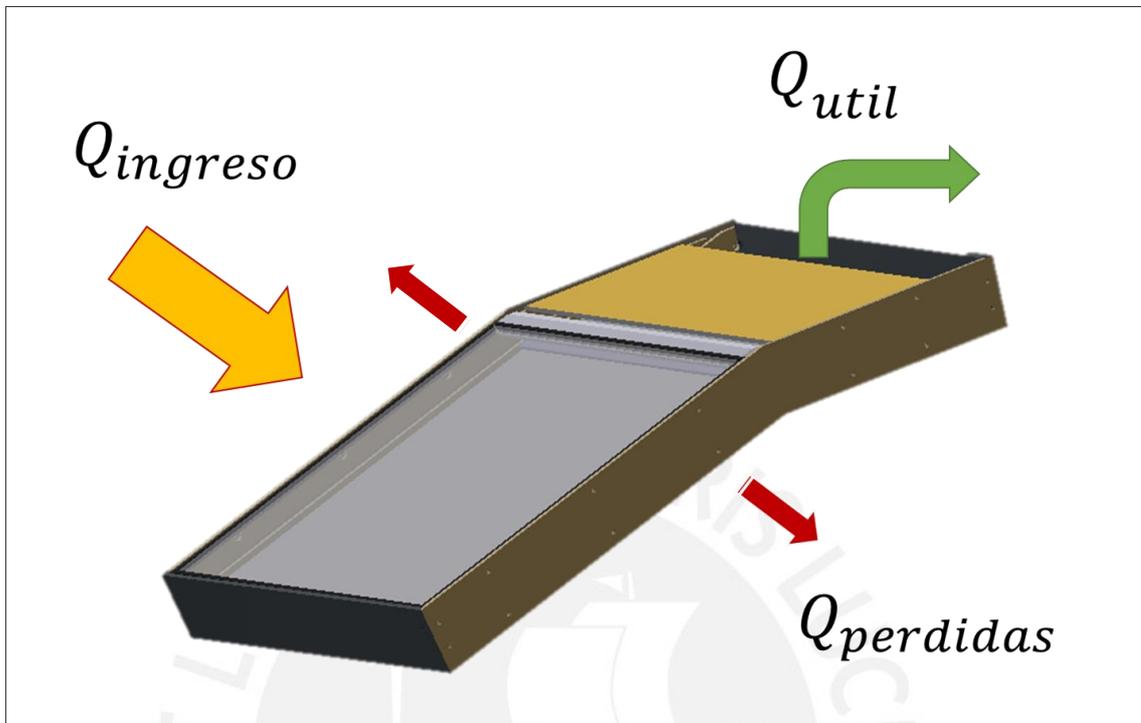


Figura 4.4.3.1. – Esquema de flujos de calor en el colector.

Con la finalidad de poder determinar los flujos de calor correspondientes y así poder conocer el coeficiente de pérdidas del sistema para las diferentes condiciones se desarrolló el siguiente proceso iterativo, para obtener el valor del coeficiente global de pérdidas por transferencia de calor del sistema.

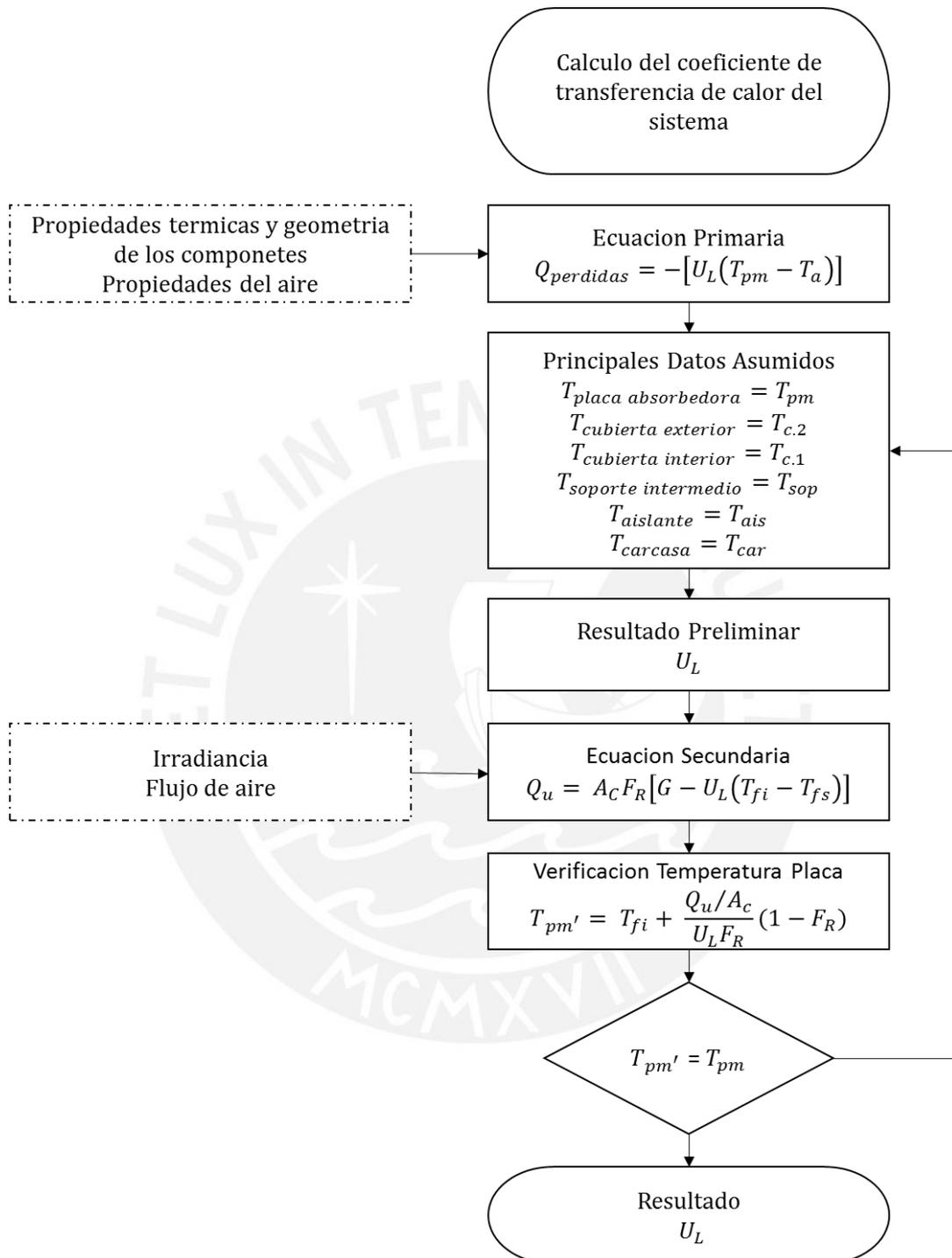


Figura 4.4.3.2. – Proceso de determinación del Coeficiente de pérdidas de calor del sistema.

A continuación se presentará un esquema de la vista en sección del colector solar con la finalidad de determinar el circuito de transferencia de calor.

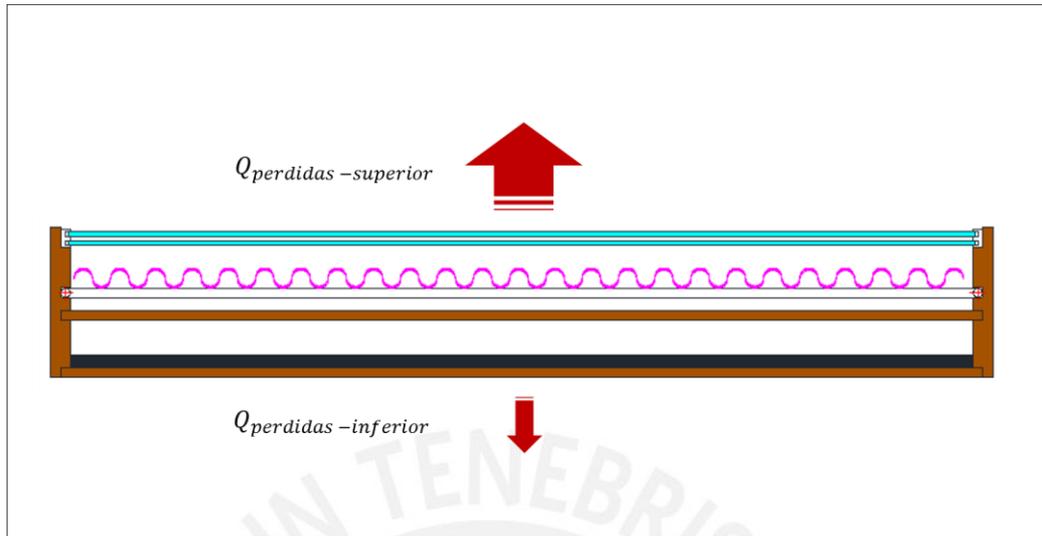


Figura 4.4.3.3. – Sección del colector solar y las pérdidas de calor.

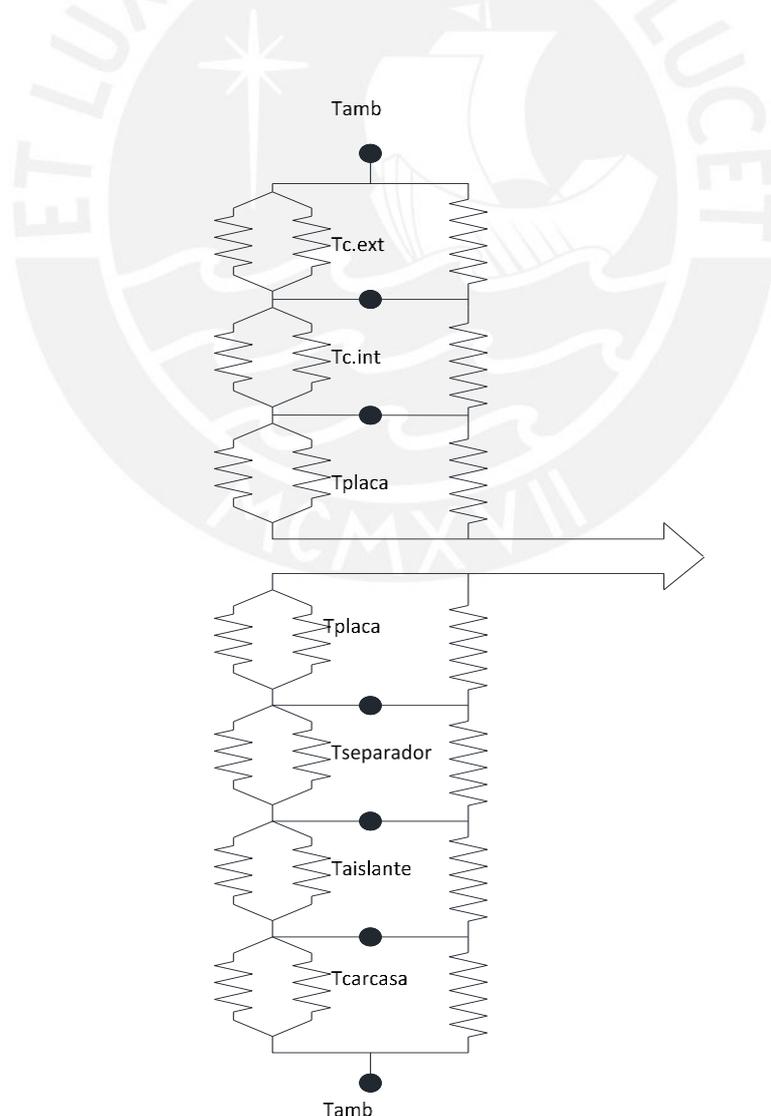


Figura 4.4.3.4.- Diagrama de resistencias equivalentes.

Con la finalidad de poder analizar el sistema de transferencia de calor se deben asumir las temperaturas mostradas en la figura. Como punto de partida para nuestro cálculo se asumirán los siguientes valores:

$$T_{pm} = 343 \text{ K}$$

$$T_{c.2} = 333 \text{ K}$$

$$T_{c.1} = 335 \text{ K}$$

$$T_{sop} = 310 \text{ K}$$

$$T_{ais} = 300 \text{ K}$$

$$T_{car} = 292 \text{ K}$$

$$T_{amb} = 283 \text{ K}$$

Como en el sistema no se produce energía, solamente se capta la proveniente del sol en la placa y esta fluye hacia la parte superior o inferior, el calor que fluye por cada etapa del sistema es igual, por lo que tenemos:

$$Q_{sup} = Q_{c.2-amb} = Q_{c.1-c.2} = Q_{placa-c.1}$$

(4.4.3.1)

$$Q_{sup} = U_{sup} \times (T_{pm} - T_{amb})$$

Donde

(4.4.3.2)

U_{sup} : Coeficiente superior de transferencia de calor, el cual se define como la inversa de la suma de las resistencias equivalentes

$$U_{sup} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

(4.4.3.3)

Para el presente diseño las resistencias equivalentes se determinan de las siguientes ecuaciones

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c.2-amb.}}$$

(4.4.3.4)

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,c.1-c.2} + h_{r,c.1-c.2}}$$

(4.4.3.5)

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,c.1-p} + h_{r,c.1-p}}$$

(4.4.3.6)

Como se aprecia en las fórmulas de las resistencias equivalentes es importante conocer como calcular el coeficiente de radiación entre placas paralelas e inclinadas, los cuales pueden calcularse de la siguiente manera

$$h_{r,p1-p2} = \frac{\sigma(T_{p2} + T_{p1})(T_{p2}^2 + T_{p1}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{p1}} + \frac{1}{\varepsilon_{p2}} - 1}$$

(4.4.3.7)

Donde

σ : Constante de Stefan Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4]$.

$\varepsilon_{p.1}$: Emisividad de la placa 1 [Adimensional].

$\varepsilon_{p.2}$: Emisividad de la placa 2 [Adimensional].

Los valores de las emisividades de los componentes del sistema son:

$\varepsilon_{\text{placa}}$	ε_{c1} y ε_{c2}	ε_{sop}	ε_{ais}	ε_{car}
0.94	0.94	0.94	0.94	0.94

Al aplicar la fórmula se obtienen los valores para los coeficientes de radiación de los tres tramos.

$$h_{r,c.2-amb.} = 6.2705 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$h_{r,c.1-c.2} = 7.4944 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$h_{r,c.1-p} = 7.8371 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Los coeficientes convectivos de los distintos tramos se calculan de la siguiente manera:

Primero, se deben hallar las temperaturas medias de cada tramo ya que debemos conocer las propiedades del aire en cada uno de esos puntos

$$T_{prom.} = \frac{(T_2 + T_1)}{2}$$

(4.4.3.8)

$$T_{placa-c.1} = \frac{(T_{placa} + T_{c.1})}{2} = 339 \text{ K}$$

$$T_{c.1.c.2} = \frac{(T_{c.1} + T_{c.2})}{2} = 334 \text{ K}$$

$$T_{c.2.amb} = \frac{(T_{c.2} + T_{amb})}{2} = 308 \text{ K}$$

Luego, con estas temperaturas se extraen las propiedades del aire a dichas temperaturas de las tablas de propiedades del aire.

Tabla 4.4.3.1 – Propiedades del aire a las temperaturas en análisis

	Viscosidad cinemática	Difusividad Térmica	Conductividad Térmica	Prandtl aprox	Densidad	Calor Específico	Viscosidad dinámica
T	v	α	k		ρ	Cp	μ
K	m ² /s	m ² /s	W/mK	Adim.	kg/m ³	J/kgK	kg/ms
	1.00E-05	1.00E-05	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-05
308	1.66	2.28	0.03	0.73	1.15	1,007	1.89
334	1.91	2.65	0.03	0.72	1.06	1,007	2.01
339	1.96	2.72	0.03	0.72	1.04	1,007	2.03

Con la finalidad de poder determinar los coeficientes de convección es que recurrimos a los números adimensionales puesto que nos brindan las herramientas apropiadas para poder despejar los valores de los mismos.

El número de Nusselt está en relación al coeficiente convectivo, por lo que de determinarlo podremos hallar este último

$$\text{Nu} = \frac{h_c L}{k} \quad (4.4.3.9a)$$

$$h_c = \frac{\text{Nu} k}{L} \quad (4.4.3.9b)$$

Donde

L : Longitud característica [m].

k : Conductividad térmica [W/mK].

h_c : Coeficiente convectivo [W/m²K].

$$\text{Nu} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\text{sen } 1.8\beta)^{1.6}}{\text{Ra} \cos \beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{\text{Ra} \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{\text{Ra} \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

Donde (4.4.3.10)

β : Ángulo de inclinación del colector [Grados sexagesimales].

Ra : Número de Rayleigh [Adimensional].

El número de Rayleigh se puede determinar con la siguiente fórmula

$$Ra = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$

Donde (4.4.3.11)

g : Constante de gravitación [m/s^2].

β' : Coeficiente volumétrico [K^{-1}].

Asimismo, es importante considerar el número de Reynolds ya que mediante el uso del mismo podremos identificar el valor de los coeficientes de convección con el ambiente

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

Donde (4.4.3.12)

v_s : Velocidad característica del fluido [m/s].

ν : Viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3].

μ : Viscosidad dinámica del fluido [kg/ms].

D : Diámetro o Longitud característica [m].

A continuación, se desarrollarán los dos casos tipo, el de transferencia entre la cubierta exterior y el ambiente que se replicará en la carcasa inferior, y el de placa y la cubierta interior que se replicará para todas aquellas superficies paralelas.

Cálculo del coeficiente para cubiertas exteriores y el ambiente.

El procedimiento consiste en el cálculo del número de Reynolds, siendo la velocidad característica del fluido la velocidad del viento en la localidad de Langui.

$$v_{s.c.2.amb} = 3 \text{ m/s}$$

Asimismo, la longitud característica sería el ancho del colector, ya que, este se encuentra paralelo a las paredes de la edificación, siendo esta la principal corriente de aire.

$$Re_{c.2.amb} = \frac{1.15 \times 3 \times 0.8}{1.89 \times 10^{-5}} = 1.46 \times 10^5$$

Cuando el valor del Número de Reynolds es menor a 10^6 se puede considerar la siguiente correlación con el Número de Nusselt

$$Nu_{c.2.amb} = 0.86 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

(4.4.3.13)

$$Nu_{c.2.amb} = 0.86 \times (1.46 \times 10^5)^{1/2} (0.73)^{1/3} = 284.79$$

$$h_{c.c.2.amb} = \frac{284.79 \times 0.03}{0.8} = 9.3447 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Cálculo del coeficiente para superficies paralelas al interior del colector.

El segundo desarrollo tipo que se presenta, es el cual se realiza para hallar el coeficiente de convección entre la placa absorbadora y la cubierta interior. Para el desarrollo de coeficientes de convección es necesario la temperatura media y las propiedades del aire, el coeficiente volumétrico y el espaciamiento entre las superficies para este caso son:

$$T_{placa-c.1} = 339 \text{ K}$$

$$\beta'_{placa-c.1} = \frac{1}{339} = 0.0029 \text{ K}^{-1}$$

$$L_{placa-c.1} = 0.04 \text{ m}$$

Con estos valores y las propiedades del aire se calcula el número de Rayleigh y luego el Número de Nusselt

$$Ra_{placa-c.1} = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha} = \frac{9.81 \times 0.0029 \times (343 - 335) \times (0.04)^3}{1.96 \times 10^{-5} \times 2.72 \times 10^{-5}} = 2.78 \times 10^4$$

$$Nu_{placa-c.1} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8 \times 15)^{1.6}}{2.78 \times 10^4 \cos 15} \right] \left[1 - \frac{1708}{2.78 \times 10^4 \cos 15} \right]^+ \\ + \left[\left(\frac{2.78 \times 10^4 \cos 15}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ = 2.99$$

Una vez conocido el Número de Nusselt utilizamos la fórmula que lo relaciona con el coeficiente de convección y determinamos este último.

$$h_{c_{placa-c.1}} = \frac{2.99 \times 2.85 \times 10^{-2}}{0.04} = 2.1311 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Al aplicar este método tipo al tramo 2, podemos lograr hallar las tres resistencias equivalentes del sistema.

$$h_{r,c.2-amb.} = 6.2705 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{r,c.1-c.2} = 7.4944 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{r,c.1-placa} = 7.8371 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{c_{placa-c.1}} = 2.1311 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{c_{c.1-c.2}} = 7.0383 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{c_{c.2.amb}} = 9.3447 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_1 = \frac{1}{9.3447 + 6.2705} = 0.06404$$

$$R_2 = \frac{1}{7.0383 + 7.4944} = 0.0688$$

$$R_3 = \frac{1}{2.1311 + 7.8371} = 0.1003$$

$$U_{sup} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{0.06404 + 0.0688 + 0.1003} = 4.2887 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En el caso del circuito inferior, existe una capa de aislamiento para la cual se debe calcular el coeficiente de pérdidas por conducción.

$$h_{co.1} = \frac{k_1}{L_1} \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$k_{ais} = 0.450 \text{ W/mK}$$

$$L_{ais} = 0.0127\text{m}$$

$$k_{car} = 0.15 \text{ W/mK}$$

$$L_{car} = 0.01\text{m}$$

$$h_{co.ais} = \frac{k_{ais}}{L_{ais}} = 3.5433 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{co.car} = \frac{k_{car}}{L_{car}} = 15.00 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Obteniendo que la resistencia equivalente para este tramo es

$$R_6 = \frac{1}{h_{co.ais} + h_{co.car}} = \frac{1}{3.5433 + 15} = 2.866$$

Luego siguiendo los ejemplos modelo de cálculo desarrollados anteriormente, se hallan las resistencias equivalentes faltantes

$$R_4 = 0.0990$$

$$R_5 = 0.1335$$

$$R_7 = 0.0703$$

Para el presente diseño las resistencias equivalentes se determinan de las siguientes ecuaciones

$$U_{inf} = \frac{1}{R_4 + R_5 + R_6 + R_7} = 0.3156 \text{ W/m}^2\text{K}$$

El coeficiente global de pérdidas del colector sería:

$$U_{global} = U_{sup} + U_{inf} = 4.6043 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Con este coeficiente se calculan las pérdidas transversales al fluido caloportador es ahora que ingresamos el análisis de la energía aprovechada por el fluido en función de la irradiancia y así poder iniciar el proceso iterativo de la transferencia de calor. Los datos conocidos que requeriremos para este análisis son la irradiancia y datos geométricos del sistema, L_1 es el espaciamiento entre superficies, L_2 y L_3 son el largo y ancho del colector:

$$G_T = 525 \text{ W/m}^2$$

$$L_1 = 0.04 \text{ m}$$

$$L_2 = 0.9 \text{ m}$$

$$L_3 = 0.85 \text{ m}$$

Se deben estimar los siguientes valores para poder realizar la iteración de manera completa.

$$T_{1,aire} = 288 \text{ K}$$

$$\dot{m}_{aire} = 0.025 \text{ kg/s}$$

$$T_{m,aire} = 293 \text{ K}$$

En este caso utilizamos la siguiente fórmula para hallar el coeficiente de radiación basado en la temperatura media del fluido

$$h_r = \frac{4\sigma T^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 293^3}{\frac{1}{0.94} + \frac{1}{0.90} - 1} = 4.8558 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Re = \frac{\dot{m}D_h}{A_f\mu} = \frac{0.025 \times (2 \times 0.04)}{0.765 \times 1.82 \times 10^{-5}} = 3,230$$

$$D_h = 2 \times L_1$$

Se verifica que el flujo sea turbulento $Re > 2100$ por lo que pasamos a analizar la relación L_2 y D_h

$$\frac{L_2}{D_h} = \frac{0.9}{0.08} = 11.25$$

De acuerdo a los estudios de Kays and Crawford cuando el valor de la relación entre L y D es mayor a 10 la siguiente correlación muestra un déficit del 16% lo cual corregimos de la siguiente manera:

$$Nu = 1.16\% \times 0.0158 Re^{0.8} = 11.76$$

$$h_c = \frac{Nuk}{D_h} = \frac{11.76 \times 2.51 \times 10^{-2}}{(2 \times 0.04)} = 3.70 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$F' = \left[1 + \frac{U_L}{h + [(1/h) + (1/h_r)]^{-1}} \right]^{-1}$$

$$F' = 0.5572$$

Al considerar la siguiente ecuación

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right]$$

Determinamos

(4.4.3.14)

$$F'' = 0.9620$$

$$F_R = 0.5361$$

Con los datos obtenidos podemos analizar el Calor útil del sistema, de acuerdo a:

$$Q_u = A_c F_R [I - U_L (T_{fi} - T_{fs})] = 0.765 \times 0.5361 \times [525 - 4.6043(288 - 283)] = 180 \text{ W}$$

Al obtener el calor útil del sistema se procede, como se indicó en el diagrama de flujo, verificando la temperatura de placa asumida, con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$T_{pm'} = T_{fi} + \frac{Q_u / A_c}{U_L F_R} (1 - F_R)$$

Cuando

(4.4.3.15)

$$T_{pm'} \neq T_{pm}$$

(4.4.3.16)

Se procede a reanudar la iteración con el valor de $T_{pm'}$ como nuevo inicio.

Como resultado de este proceso se obtiene que el Coeficiente de pérdidas es de 4.1995 W/m²K, análisis para un determinado momento del día, 3.5 horas del mediodía solar en este caso, bajo un flujo determinado de aire. Por lo cual se procede a determinar un promedio del coeficiente bajo ciertas condiciones.

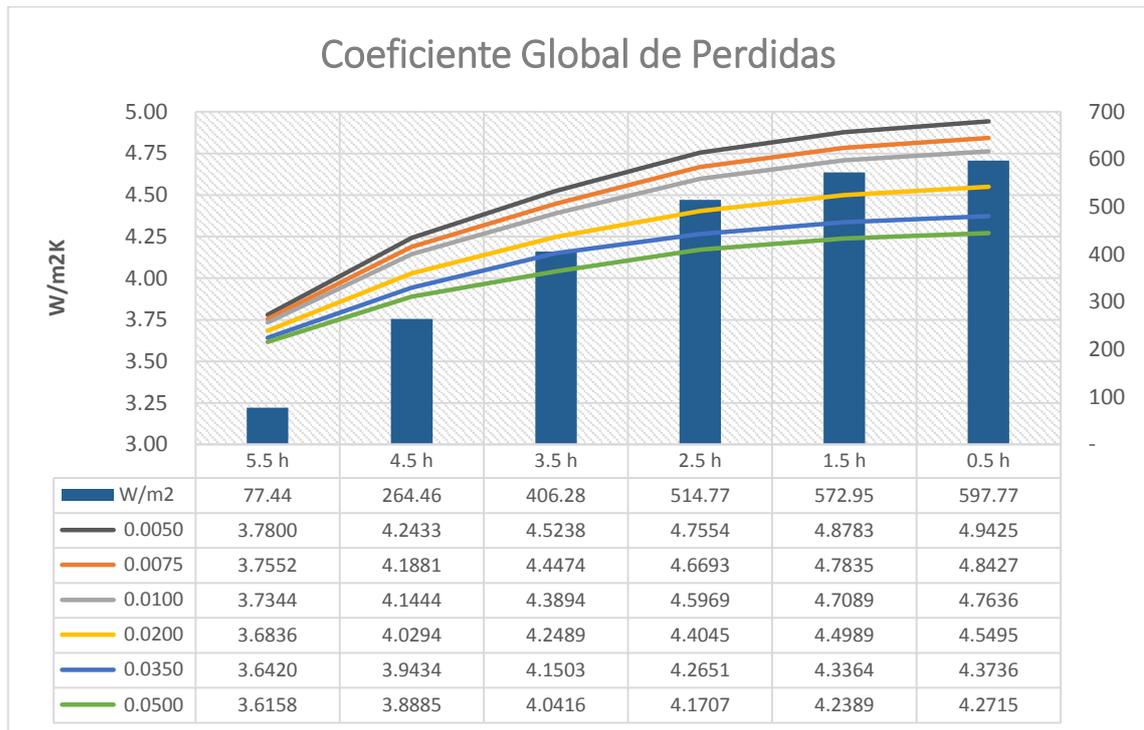


Figura 4.4.3.5. – Coeficiente global de pérdidas bajo diferentes condiciones.

El valor promedio de este análisis es de 4.29.17 W/m² K, al conocer este valor ya tenemos todas las herramientas para determinar el calor útil que producirá el sistema.

4.4.4 Determinación del calor útil del sistema

Se procede a determinar el calor útil para diferentes momentos del día y verificaremos su impacto en la habitación de la posta de salud. Para el caso específico de Langui utilizaremos el coeficiente de pérdidas para cada instante, para otras aplicaciones se puede tomar el promedio hallado anteriormente para simplificar el procedimiento.

Tabla 4.4.4.1 – Calor útil aportado y eficiencia del sistema.

Hora	Horas del mediodía solar						
	5.7	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
<i>S</i>	-	78	296	462	586	652	687
<i>Q_u</i>	-	-	123	213	269	298	309
Eficiencia %	-	-	45	53	53	53	52

El calor aportado por el sistema en promedio para los meses de mayo en Langui es de 2,300 W por lo cual ahora debemos aplicar la fórmula de calor y verificar que nos proporcione del calor requerido.

$$Q = mC_p(T_2 - T_1)$$

(4.4.4.1)

El objetivo de la tesis fue incrementar en 10 grados la temperatura, por lo que procedemos a verificar el requerimiento de la habitación. Se considera un volumen de la misma de 22.5 m³ y una tasa de refrescamiento de 2 m³/ hora con lo cual el volumen a calentar final es de 70.5 m³, la densidad promedio del aire a las temperatura evaluadas es de 1.2 kg/ m³ por lo tanto tenemos;

$$Q_{aire} = 70.5 \times 1.2 \times 1.006(10) = 851.08 \text{ kJ / dia}$$

En adición de acuerdo a la Tesis de Ronald Herrera Prado Cama Calefactora una persona al descansar requiere de 1,300 kJ por 10 horas sin embargo al ser una posta médica se considera descanso de 24 horas por lo que tenemos:

$$Q_{persona} = \frac{24}{10} \times 1300 = 3,120 \text{ kJ / dia}$$

Finalmente se suman los requerimientos de calor el cual debe ser menor que la producción del sistema.

$$Q_{requerido} = Q_{aire} + Q_{persona} = 851 + 3120 = 3,971 \text{ kJ / dia}$$

Convirtiendo el calor requerido a Watts tenemos

$$Q_{requerido} = \frac{3,971}{3.6} = 1,103 \text{ W}$$

Al ser el calor útil mayor que el requerido se dan por cumplidos los objetivos del diseño.

CAPÍTULO 5

DESARROLLO DEL PROCESO DE SELECCIÓN

El presente apartado, busca facilitar la diversificación de la tecnología desarrollada, con el fin de que la misma pueda ser replicada en localidades con condiciones climáticas similares.

5.1 Definición de los parámetros de selección a emplear.

Acorde con el objetivo de diversificación se ha buscado simplificar los datos de entrada a la tabla a únicamente tres parámetros accesibles al público en general. A continuación presentamos los parámetros a utilizar:

Temperatura ambiente promedio:

Como se aprecia en la sección de los cálculos, este es el punto de partida para el análisis de la problemática y el estudio termodinámico. Recordar que el sistema se diseña con el valor nominal de diferencia de temperaturas a la entrada y salida de 10 grados.

Velocidad de viento promedio:

Este factor es de vital importancia, debido a que, a mayores velocidades de viento la transferencia de calor del sistema con su entorno incrementa drásticamente, por lo que se perderá eficiencia.

Irradiación solar promedio diaria:

Valor fundamental en nuestro análisis, debido a que, es la fuente de energía que nos permite aprovechar la misma de una manera adecuada para nuestro confort.

En adición a los parámetros antes mencionados es importante reconocer que cambios drásticos entre los valores presentados en el cálculo de la tesis y la localidad objetivo en los siguientes parámetros pueden alterar el desempeño del sistema.

Presión atmosférica:

Su importancia radica en la variación de las propiedades físicas del aire a diferentes a presiones y temperaturas. En caso no se pueda contar con una tabla isobárica, a la presión indicada de propiedades físicas del aire, se podrán utilizar tablas de a presión de una atmósfera. La densidad si deberá corresponder a la presión atmosférica real.

Horas de irradiación útil:

Determina las horas útiles de nuestro sistema, es uno de los parámetros limitantes de nuestro sistema.

Volumen de habitación y tasa de refrescamiento:

El producto del volumen de la habitación y la tasa de refrescamiento nos brindará la cantidad total de aire a calentar.

Latitud de la localidad:

La latitud de la zona donde se instalará el dispositivo nos indicará el ángulo de inclinación con el cual debemos instalar nuestro sistema. El método de selección se ha generado asumiendo una inclinación de 15 °C debido a que la mayoría del territorio alto andino del Perú se encuentra en la mencionada latitud. Para aplicaciones en latitudes mayores a 15 ° se deberán realizar correcciones a los cálculos, para latitudes inferiores

no hay problema debido a que 15° es el mínimo recomendable para que la superficie del colector sea auto limpiante.

5.2 Método de selección

Con la finalidad de que el usuario del proceso de selección no deba realizar cálculos, se ha generado un método de codificación mediante tabla para su fácil utilización.

Identificación temperatura ambiente promedio

Ingresar a la tabla cálculo de las propiedades del aire e identificar la codificación resultante para la temperatura estimada. Para el caso de Langui el código sería C

Tabla 5.2.1.-. Método de selección código temperatura

TEMPERATURA [GRADOS CELSIUS]			
	-10	0	10
	A	B	C

Identificación velocidad del viento promedio

Se identifica el valor aproximado de velocidad del viento en la zona de manera vertical en la tabla y de acuerdo al código anterior que corresponde a la horizontal se determina el nuevo código.

Tabla 5.2.2.-. Método de selección código velocidad del viento.

CODIGO ANTERIOR	VELOCIDAD DEL VIENTO [M/S]		
	2	4	6
A	A2	A4	A6
B	B2	B4	B6
C	C2	C4	C6

En el caso de Langui la velocidad del viento es de 3 m/s por lo que en este caso debemos considerar un escenario menos favorable como sería una velocidad de 4 m/s, con lo cual el código obtenido es C4.

Identificación del recurso solar promedio

De acuerdo a los mapas solares u otras fuentes de información utilizamos este dato para obtener la cantidad estimada de calor útil que nos brindara el sistema.

Tabla 5.2.3.- Método de selección Watts disponibles.

CODIGO ANTERIOR	RECURSO SOLAR [KWH/DIA]				
	4.5	5	5.5	6	6.5
A2	1550	1940	2400	2820	3250
A4	1440	1830	2290	2710	3140
A6	1380	1760	2220	2650	3070
B2	1740	2140	2600	3040	3470
B4	1640	2040	2500	2930	3370
B6	1590	1980	2440	2870	3300
C2	1960	2360	2830	3270	3710
C4	1875	2270	2740	3180	3620
C6	1820	2220	2690	3130	3560

En el caso desarrollado en los capítulos anteriores el recurso solar correspondió al mes de mayo y su valor es de 5 kWh/día por lo que obtenemos que un colector solar brindara 2,270 W valor que resulta muy similar al obtenido en el desarrollo específico de la aplicación.

Calculo de cantidad de colectores requeridos

Para establecer la cantidad de colectores requeridos para la aplicación hay que analizar la necesidad energética para lo cual se presentan a manera simplificada los siguientes valores.

01 Persona descansando requiere 865 Watts diarios.

01 Habitación de 9 m² incluyendo la tasa de refrescamiento requiere de 235 Watts diarios.

Por lo que para determinar la cantidad de colectores únicamente habrá que sumar los requerimientos y compararlos con el calor disponible. Por ejemplo;

Se requiere calentar una habitación de 9 m² en la cual descansaran 02 personas. La temperatura ambiente es de 10 grados, la velocidad del viento promedio es de 2 metros por segundo y el recurso solar es de 5.5 kWh/día.

		Temperatura [Grados Celsius]				
		-10	0	10		
		A	B	C		
Codigo anterior		Velocidad del viento [m/s]				
		2	4	6		
A		A2	A4	A6		
B		B2	B4	B6		
C		C2	C4	C6		
		Recurso solar [kWh/día]				
Codigo anterior		4.5	5	5.5	6	6.5
A2		1550	1940	2400	2820	3250
A4		1440	1830	2290	2710	3140
A6		1380	1760	2220	2650	3070
B2		1740	2140	2600	3040	3470
B4		1640	2040	2500	2930	3370
B6		1590	1980	2440	2870	3300
C2		1960	2360	2830	3270	3710
C4		1875	2270	2740	3180	3620
C6		1820	2220	2690	3130	3560

Figura 5.2.1.-. Ejemplo de uso de las tablas de selección.

El calor que puede ser entregado por el sistema es de 2,830 W.

El calor requerido por las personas es de 865 x 2 = 1,730 W.

El calor requerido por la habitación es de 235 W.

El calor requerido total es de 1,965 W lo cual es menor a 2,830 W por lo que un solo colector es suficiente.

En caso el requerimiento sea mayor que el calor entregado se debe de contar con un número mayor de colectores.



CONCLUSIONES

Se diseñó un sistema de calefacción solar para la posta de salud de Langui, el cual alcanza una eficiencia promedio del 47.7%. Asimismo se aprecia que inclusive en condiciones desfavorables de temperatura ambiente de -10 grados, velocidad del viento de 6 m/s y recurso solar de 4.5 kWh el calor generado por el sistema sería de 1,380W lo cual satisface el calor requerido para la aplicación.

El sistema de calefacción diseñado cumple con los requisitos planteados, puesto que se ha logrado elevar la temperatura interior de una habitación de la posta de salud en 10 °C, utilizando un sistema económico, con una vida útil aceptable, debido a los materiales empleados, se ha mantenido la simpleza en el sistema facilitando la instalación y el mantenimiento.

Las pérdidas por convección con el medio ambiente se ven sumamente reducidas al incorporar una segunda cubierta en el sistema, lo cual incrementa su eficiencia.

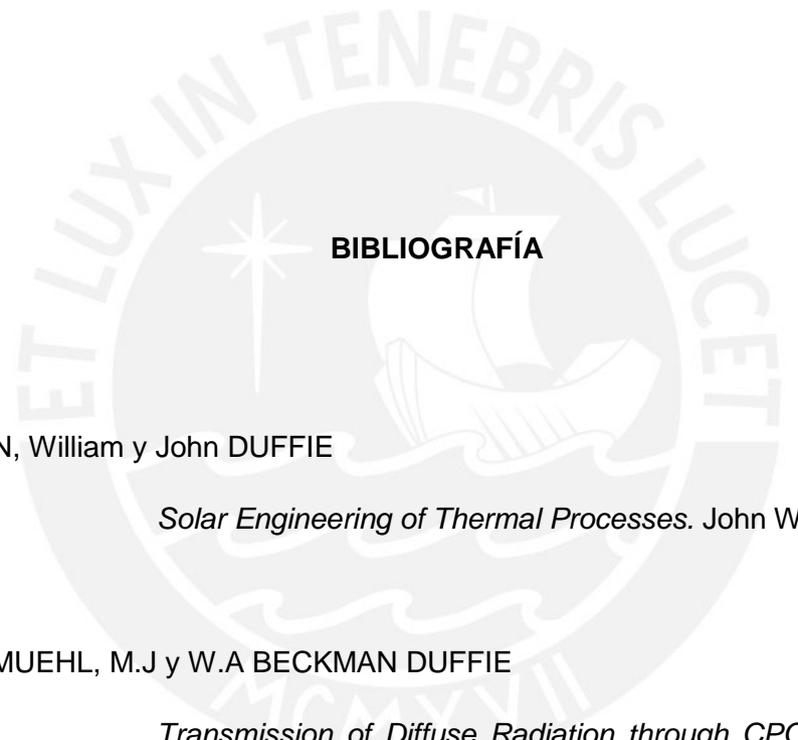
Se ha podido generar un proceso de selección para la implementación de sistemas similares en ubicaciones de características semejantes, el cual permite al usuario seleccionar de manera sencilla la cantidad de colectores requeridos, en función de parámetros accesibles como son el recurso solar, el viento, la temperatura ambiente y el tamaño de la habitación.

RECOMENDACIONES

Es de suma importancia minimizar cualquier tipo de pérdidas de energía, esto incluye tanto las uniones del colector como las condiciones del recinto objetivo, por lo que se recomienda verificar la hermeticidad del colector y de las habitaciones principalmente techos, ventanas, puertas y junta de paredes.

Es importante realizar la limpieza de manera continua a la cubierta del colector, puesto que, la acumulación de polvo sobre la misma genera una caída en la eficiencia.

Para aquellos casos en los cuales la masa térmica de las habitaciones sea reducida y se pueda anticipar que no retendrá el calor por las noches, se puede instalar el presente sistema en conjunto con una cama calefactora con la finalidad de obtener mayores beneficios.



BIBLIOGRAFÍA

BECKMAN, William y John DUFFIE

2013

Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons Inc.

BRANDEMUEHL, M.J y W.A BECKMAN DUFFIE

1980

*Transmission of Diffuse Radiation through CPC and Flat-Plate
Collector Glazings.*

FERNÁNDEZ DÍEZ, Pedro

2005

Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura.
Santander: Universidad de Cantabria, Departamento de
Ingeniería Eléctrica y Energética.

FERNÁNDEZ SALGADO, José María

2010 *Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica.* Madrid: AMV Ediciones.

MADRID VICENTE, Antonio

2009 *Energía solar térmica y de concentración: Manual Práctico De Diseño, Instalación Y Mantenimiento.* Madrid: AMV Ediciones.

2009 *Curso De Energía Solar (Fotovoltaica, Térmica Y Termoeléctrica).* Madrid: AMV Ediciones.

SIBAJA, Eduardo y Donald PETERSON

1985 *Colectores Solares.* Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ (SENAMHI)

2003 *Atlas de energía solar del Perú.*

2010 *Atlas de heladas del Perú.*

INCROPERA, Frank y DEWITT

1996 *Fundamentos De Transferencia De Calor.* Pearson,

LUNDE, Peter

1980 *Solar thermal engineering. Space heating and hot water Systems.* John Wiley & Sons Inc.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY

2011 by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America.

CRIADO GONZÁLEZ, Ana

2009 *Diseño de una instalación solar térmica multipropósito para un edificio de viviendas en granada.*

GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL DE LA PUCP

Proyecto "Warming of Andean House". Loreta Haaker – Ing. Miguel Hadzich.

KAYS, W.M y M.E CRAWFORD

1980 *Convective Heat and Mass Transfer.*

KORNHER, Steve y Andy ZAUGG

2006 *The complete handbook of solar air heating Systems.* Knowledge publications.

HERRERA PRADO, Ronald

2011 *Diseño de una cama calefactora para regiones frías.* Tesis correspondiente al grado de ingeniero mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.