

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**DISEÑO ENERGÉTICO DE UN SUELO RADIANTE PARA UNA  
SALA DE 12 M<sup>2</sup> UBICADA A 4000 MSNM EN LANGUI-CUZCO**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

**Davy Alfonso Olivera Oliva**

**ASESOR: MIGUEL HADZICH MARÍN**

Lima, Marzo del 2011

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis busca mostrar una forma de calefacción diferente llamada Calefacción por Suelo Radiante, que consiste en instalar tuberías de un material termoplástico, denominado PEX, en el interior del suelo; por estas tuberías circula agua caliente la cual eleva la temperatura del suelo y por ende de la habitación. Por ello, el objetivo principal de esta tesis es diseñar un SUELO RADIANTE para poder mejorar la calidad de vida de las personas en el poblado de Langui. El “Suelo Radiante” será diseñado para el pueblo de Langui, ubicado en el departamento del Cuzco, a una altura de aproximadamente 4000msnm.

La tesis ha sido estructurada en cuatro capítulos, en el primero, se describe la situación que hay en el poblado de Langui y los problemas que generan en la salud de las bajas temperaturas. En el segundo capítulo se muestra las diferentes formas de transferencia de calor involucradas en el diseño del sistema a instalar, tales como la conducción, convección y radiación; también se muestran algunas consideraciones para obtener el confort térmico, además se muestran las partes que constituyen el Suelo Radiante, sus distintas formas constructivas, ventajas y desventajas. En el tercer capítulo se muestra el procedimiento de diseño para poder calcular y seleccionar los distintos componentes que se encuentran en Suelo Radiante, basándonos de la Metodología enseñada en los cursos de Proyecto de Ingeniería Mecánica 1 y 2, para finalmente poder cotizar los elementos y conocer el precio real de la instalación (sin mano de obra, solo materiales y componentes) que son mostrados en el cuarto capítulo.

Al final del trabajo realizado en la presente tesis se ha podido concluir que el sistema si funciona ya que se ha podido instalar y hacer algunas pruebas de funcionamiento en la zona, aunque si bien es cierto la construcción no estaba contemplada en la tesis pero se ha podido realizar, además que dicho sistema resulta amigable con el medio ambiente ya que no se emplea combustibles fósiles, si no, se emplean únicamente energías renovables.

## ÍNDICE

Introducción	1
1. Aspectos Generales	4
1.1. Problemática	4
1.2. Propuesta de Solución	6
1.2.1. Objetivos Generales	7
1.2.2. Objetivos Específicos	7
2. Fundamento Teórico	8
2.1. Fundamentos de Transferencia de Calor	8
2.1.1. Conducción	8
2.1.2. Convección	9
2.1.3. Radiación	10
2.2. Confort Térmico	12
2.3. Descripción del Suelo Radiante	13
2.3.1. Suministro de Energía	16
2.3.2. Sistema de Tuberías	17
2.3.3. Componentes	19
2.4. Datos del Lugar de Instalación	21

2.4.1.	Datos geográficos	21
2.4.2.	Datos climáticos	23
2.4.3.	Descripción de la Vivienda	26
3.	Diseño y Cálculos	28
3.1.	Metodología	28
3.2.	Lista de Exigencias	30
3.3.	Estructura de Funciones	32
3.4.	Matriz Morfológica	33
3.5.	Conceptos de Solución	34
3.6.	Proyectos Preliminares y Proyecto Óptimo	37
3.7.	Cálculos del Sistema	45
3.7.1.	Cálculo de Cargas Térmicas	46
3.7.2.	Cálculo del Suelo Radiante	51
3.7.3.	Selección del Colector Solar	69
3.7.4.	Selección del Sistema Fotovoltaico	71
3.7.5.	Cálculo del aislamiento en la tubería	77
4.	Costos	82
4.1.	Suelo Radiante	82

4.2.	Colector Solar	83
4.3.	Sistema Fotovoltaico	83
4.4.	Costo Total	83
	Conclusiones y Recomendaciones	85
	Bibliografía	87
	Anexos	

---

Ing. Miguel Hadzich

Asesor

## AGRADECIMIENTOS

- A mis padres, hermana y abuela por haberme apoyado siempre, especialmente en la elaboración de esta tesis.
- A mi asesor Miguel Hadzich por su apoyo para la realización de la tesis.
- A Ursula Harman por haber conseguido el financiamiento para la instalación del sistema.
- A Fernando Carpio quien apoyó en la construcción e instalación del sistema.
- A Urphy Vásquez por haberme brindado información y apoyo para el desarrollo del proyecto.



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Capítulo 2

$T_1$	: Temperatura zona 1 (°C)
$T_2$	: Temperatura zona 2 (°C)
$\overset{\circ}{q}_x$	: Calor en dirección x (W)
$A$	: Área perpendicular al flujo de calor (m <sup>2</sup> )
$\lambda$	: Coeficiente de conductividad térmica (W/(m°C))
$\Delta x$	: Espesor de la plancha (m)
$r_1$	: Radio interno de la tubería (m)
$r_2$	: Radio externo de la tubería (m)
$L$	: Longitud de la tubería (m)
$\alpha$	: Coeficiente convectivo (W/°C)
$\sigma$	: Constante de Stefan-Boltzmann (W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ))
$\varepsilon$	: Emisividad (adimensional)
$F_\varepsilon$	: Factor de corrección por emisividad (adimensional)
$F_2$	: Factor de forma (adimensional)

### Capítulo 3

$\lambda$	: Coeficiente de conductividad térmica (W/(m°C))
$\overset{\circ}{Q}_{temperaturas}$	: Flujo de calor debido a la diferencia de temperaturas (W)
$\overset{\circ}{Q}_{ventilacion}$	: Flujo de calor debido a la ventilación (W)

$\overset{\circ}{V}_{\min}$	: Caudal de volumen de aire en la habitación ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$f_k$	: Factor de corrección por el tipo de calefacción (adimensional)
<i>Volumen</i>	: Volumen de aire dentro de la casa ( $\text{m}^3$ )
<i>tiempo</i>	: Tiempo de renovación de aire (s)
$q_{\max}$	: Máxima cantidad de calor por unidad de área que puede ceder el suelo radiante ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{\text{diseño}}$	: Cantidad de calor por unidad de área que necesita la habitación ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$\overset{\circ}{Q}_{\text{total}}$	: Calor total cedido por el suelo radiante (W)
$\overset{\circ}{Q}_{\text{tierra}}$	: Calor cedido a la tierra por el suelo radiante (W)
$\overset{\circ}{Q}_{\text{habitacion}}$	: Calor cedido a la habitación por el suelo radiante (W)
$v$	: Velocidad del agua dentro de la tubería (m/s)
<i>caudal</i>	: Caudal del agua dentro de la tubería ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$D_{\text{int}}$	: Diámetro interno de la tubería (m)
$\rho$	: Densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Re	: Número de Reynolds (adimensional)
$\mu$	: Viscosidad dinámica del agua (kg/ms)
Pr	: Número de Prandtl (adimensional)
$C_p$	: Capacidad calorífica del agua ( $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ )
$k_{\text{agua}}$	: Conductividad térmica del agua ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$ )
$Nu$	: Número de Nusselt (adimensional)
$\zeta$	: Factor de fricción de Darcy (adimensional)
$L$	: Longitud de la tubería (m)



$\sigma$	: Diferencia de temperaturas entre el ingreso y salida del agua de la tubería (°C)
$P_1$	: Presión estática en el punto 1 (Pa)
$P_2$	: Presión estática en el punto 2 (Pa)
$v_1$	: Velocidad del agua dentro de la tubería en el punto 1 (m/s)
$v_2$	: Velocidad del agua dentro de la tubería en el punto 2 (m/s)
$z_1$	: Altura dentro de la tubería en el punto 1 (m)
$z_2$	: Altura dentro de la tubería en el punto 2 (m)
$h_{man}$	: Pérdidas dinámicas en la tubería (m.c.a.)
$m_{aire}$	: Masa de aire dentro de la habitación (kg)
$h_{final}$	: Entalpía final del aire (kJ/kg)
$h_{inicial}$	: Entalpía inicial del aire (kJ/kg)
$d_1$	: Diámetro interior de la tubería (m)
$d_2$	: Diámetro exterior de la tubería (m)
$d_3$	: Diámetro exterior de la tubería con aislamiento (m)
$k_{aislamiento}$	: Conductividad térmica del aislamiento (W/(m°C))
$\alpha_{aire}$	: Coeficiente convectivo del aire (W/°C)
$k_{aire}$	: Conductividad térmica del aire (W/(m°C))
$Ra$	: Número de Rayleigh
$Gr$	: Número de Grashof
$\beta$	: Coeficiente de expansión térmica (1/K)
$\nu$	: Viscosidad cinemática del aire (m <sup>2</sup> /s)
$E_{perdida}$	: Energía perdida por la tubería (J)

$T_{inicial}$  : Temperatura inicial del agua (°C)

$T_{final}$  : Temperatura final del agua (°C)



## INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del hombre, éste ha aprovechado los recursos naturales disponibles en la naturaleza con el fin de desarrollar herramientas que faciliten su vida, como por ejemplo, empezó a usar piedra para construir herramientas de caza, luego dejó de lado la piedra y empleó metales y así sucesivamente; en la actualidad, por ejemplo, trabaja y modifica la estructura molecular de los materiales para lograr mejorar sus propiedades. Para lo mencionado anteriormente, fue de vital importancia el uso de la energía, en un inicio sólo empleó su propia energía para fabricar sus herramientas, luego usó la energía de los animales, conforme fue evolucionando y desarrollando más técnicas empezó a utilizar el fuego, combustibles fósiles, y en las últimas décadas, por ejemplo, la energía nuclear. Debido al desarrollo de herramientas que ha tenido y al aprovechamiento de la energía, el hombre ha modificado el medio que lo rodea para adecuarse a él, por ejemplo, ha construido casas en lugares muy fríos donde ha desarrollado sistemas de calefacción que le permitan protegerse de las bajas temperaturas.

Para todo este desarrollo, ha sido importante el uso de energías, pero esto ha ido cambiando a través del tiempo, no sólo en el tipo de energía empleada sino también en la forma de emplearla; en la actualidad se trata de ahorrar la mayor cantidad de energía, en comparación con el pasado, no solo por el ahorro económico que genera sino también por el impacto ambiental, ya que la mayor fuente energética en la actualidad es el combustible fósil. El uso de este tipo de combustible genera daños en nuestro medio ambiente, ya que al quemarlos se producen gases que generan la contaminación del aire, efecto invernadero, lluvia ácida, entre otros.

Por lo expuesto anteriormente, muchas organizaciones, universidades, empresas están destinando fondos para desarrollar tecnologías que aprovechen energías alternativas, entre ellas se encuentran las energías renovables tales como la solar, eólica, mareomotriz, etc. De todas las energías mencionadas, la energía solar es la que se encuentra disponible en cualquier parte del mundo y de manera gratuita, la cual se puede aprovechar de las siguientes tres maneras:

- **Formación de biomasa por fotosíntesis:** Es un proceso fundamental y natural existente en nuestro planeta. Gracias a ello las plantas pueden realizar su ciclo de vida y gracias a ello se puede generar la biomasa, en este caso la leña, que en países no desarrollados puede ser de vital importancia. Por ejemplo en algunos países africanos el uso de energía por leña representa el 90% de la energía a nivel nacional.
- **Energía solar fotovoltaica:** Es empleada para generar electricidad. En la actualidad este tipo de aprovechamiento de energía es muy importante para la electrificación en zonas donde no se tiene acceso a la red eléctrica.
- **Energía solar térmica:** Es empleada para poder calentar un fluido para múltiples aplicaciones, como puede ser el secado, cocinar o simplemente para poder aumentar la temperatura del agua.

En nuestro país, las regiones con mayores valores de radiación solar son Arequipa, Puno y Cuzco; las cuales, paradójicamente, son regiones afectadas por las bajas temperaturas en los meses de junio, julio y agosto. Además, Cuzco y Puno son parte de las regiones más pobres del Perú con 57.4% y 67.2% de pobreza (según el sondeo realizado por el INEI en el 2007). Estas razones son importantes para que se tomen acciones tales como aprovechar los recursos que se tienen disponibles en la zona, en este caso aprovechar la energía solar disponible para poder disminuir los efectos de las bajas temperaturas.

Se ha observado que específicamente en la región del Cuzco, provincia de Canas, distrito de Langui, los pobladores al llegar de su jornada laboral (aproximadamente a las 5pm) se internan en sus cocinas para poder calentarse con el calor que se disipa de la cocina con los gases de combustión que se generan en las mismas. Ante dicha problemática, varias organizaciones han realizado proyectos para combatir el frío en dicha zona como por ejemplo, el Grupo de Apoyo al Sector Rural de la Pontificia Universidad Católica del Perú que conjuntamente con la Cruz Roja han instalado "Muros Trombe", esta tecnología aprovecha la energía solar para poder aumentar la temperatura del aire y de ese modo brindar confort en el interior de las viviendas; este tipo de muros no son las únicas alternativas de calefacción en zonas rurales. En vista

que no pueden usarse radiadores o sistemas que empleen electricidad, aparece una tecnología que ha sido desarrollada hace mucho tiempo en Europa, denominada SUELO RADIANTE. Esta tecnología está conformada por un conjunto de tubos que se encuentran colocados debajo del suelo, por los cuales pasa un fluido caliente que incrementa la temperatura del ambiente en el cual se encuentra instalado, logrando el confort térmico de las personas que se encuentran dentro del recinto.

Esta tecnología presenta una serie de ventajas como por ejemplo, una distribución ideal de temperatura, ahorro de energía, estética, entre otras cosas. Las desventajas son que poseen una mayor inercia térmica, es decir, primero se tiene que calentar el suelo para luego calentar el ambiente, y además posee un mayor costo de instalación, pero si se toma en cuenta que esta tecnología tiene un tiempo de vida de aproximadamente 10 años, entonces, empieza a ser atractiva para los usuarios.

Actualmente existen muchas maneras de calentar el fluido que circula por las tuberías del suelo radiante, ya que puede ser calentado por un banco de resistencias, por una pequeña caldera, aprovechando los gases de escape de algún quemador o con radiación solar.

Por ello, el presente trabajo busca diseñar un “Suelo Radiante” que pueda ser empleado en la zona de Langui, como una alternativa frente al “Muro Trombe”, para tener otra alternativa de solución al problema de las bajas temperaturas, no reemplazarla, sino mas bien poder tener otra solución y poder compararlas. Finalmente decidimos por la que mejor se adecúe a las condiciones de la zona de aplicación. Cabe resaltar, que en Langui se tiene construída una “Casa Ecológica Andina”, la cual ha sido construida para que en un futuro sea tomada como casa modelo y los pobladores puedan reproducir las diversas tecnologías que ahí se demuestran. Las tecnologías que se encuentran en dicha casa funcionan gracias al aprovechamiento de energías renovables o en todo caso han sido mejoradas para incrementar su rendimiento, por ejemplo, se cuenta con un muro trombe, una terna solar, una cocina mejorada y una cuyera, además la casa ha sido construida con tecnología antisísmica, basados en los modelos diseñados en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

## CAPÍTULO 1 ASPECTOS GENERALES

### 1.1. Problemática

Las zonas alto andinas de nuestro país, junto con las zonas amazónicas, son las más olvidadas y las que menos beneficios reciben por parte del gobierno central; no solo ello, sino también son las zonas donde las personas poseen menos recursos económicos. Además, muchas veces no se cuenta con los servicios básicos, como son el agua potable, desagüe y energía eléctrica, haciendo que los pobladores posean una baja calidad de vida.

Una zona en particular es el pueblo de Langui, Cuzco, ubicado a 4000 msnm., donde la población se dedica principalmente a la ganadería y a la agricultura. Lugar en donde no toda la población cuenta con energía eléctrica, ni sistemas de desagüe y además, se ve afectado por las bajas temperaturas en los meses de Junio, Julio y Agosto.

Durante este periodo las temperaturas bajan considerablemente durante la noche, alrededor de  $-15^{\circ}\text{C}$ , y a veces a temperaturas más bajas como los  $-20^{\circ}\text{C}$ , generando serios problemas en los niños y los ancianos ya que podría causarles la muerte.

Ante dicho problema, muchas personas adoptan ciertas medidas para luchar contra las bajas temperaturas, una de ellas es el dormir cerca de la cocina encendida; esto

origina un serio problema porque los pobladores estarían respirando gases de combustión, los cuales son nocivos para la salud. Esto podría generar en el futuro problemas respiratorios, llegar a generar asfixia o en el peor de los casos podría generar cáncer.



*Figura N°1: Casa rural con la cocina en la sala [6]*

Lastimosamente, este es uno de los pocos métodos que tienen los pobladores para calentarse ya que no se cuenta con energía eléctrica ni con el dinero para poder instalar un sistema de calefacción por radiadores, aunque en la actualidad, en Langui, se viene instalando los Muros Trombe (ver Figura N°2), que son sistemas que aprovechan la energía solar para poder calentar un ambiente seleccionado.



*Figura N°2: Muro Trombe instalado en Langui en el proyecto realizado por el GRUPO-PUCP conjuntamente con la Cruz Roja. [7]*

## 1.2. Propuesta de Solución

Ante dicha problemática, se ha investigado para dar una alternativa de solución nueva o, en todo caso, distinta a la del Muro Trombe, para poder compararlas y escoger la que mejor se adecúe a la realidad de nuestro país o de la zona en estudio, esta alternativa es el “Suelo Radiante”, un sistema que es muy poco conocido en nuestro país, debido a que no se hacen instalaciones de sistemas de calefacción, pero es muy conocido en Europa. En este tipo de instalaciones, se hace pasar agua caliente por unas tuberías que se encuentran debajo del piso, logrando de esa manera aumentar la temperatura de la habitación. La presente tesis busca adecuar dicho sistema a la realidad de Langui, es por ello que se empleará la energía solar como aporte térmico ya que en dicha localidad no cuenta con electricidad como para emplear radiadores y emplear una caldera sería complicado por el costo de conseguir combustibles fósiles.



Por ello, la presente tesis busca una solución al problema ya planteado teniendo como objetivos:

#### 1.2.1. Objetivos Generales:

- Diseñar un SUELO RADIANTE para poder mejorar la calidad de vida de las personas en el poblado de Langui.

#### 1.2.2. Objetivos Específicos:

- Comparar la norma DIN-EN-1264 con el cálculo de transferencia de calor convencional y ver sus diferencias.
- Conocer qué tan viable es elaborar un Suelo Radiante que emplee solamente Energías Renovables.

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. Fundamentos de Transferencia de Calor

#### 2.1.1. Conducción

La transferencia de energía se da por comunicación molecular directa sin que las moléculas se desplacen de manera apreciable. Este proceso se basa en la Ley de Fourier, la que especifica que un flujo de calor ( $\overset{\circ}{q}_x$ ) es proporcional al gradiente de temperaturas ( $\partial T$ ) que se genera en una dirección “x”, al área (A) perpendicular a la dirección “x” y a una constante de proporcionalidad denominada “Conductividad Térmica” (k)

$$\overset{\circ}{q}_x (W) = k \times A \times \frac{\partial T}{\partial x}$$

a. **Conducción para Placas Planas:** Considerando un estado estacionario con un espesor “ $\Delta x$ ” y con un ancho considerablemente grande con respecto al espesor:

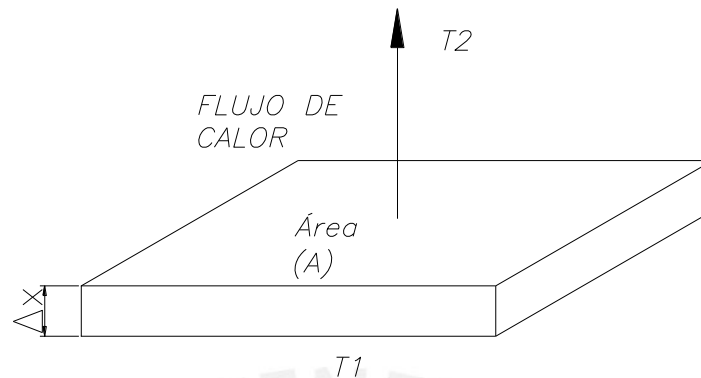


Figura N°3: Flujo de calor por conducción para superficies planas

$$q_x (W) = k \times A \times \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x}$$

- b. Conducción para Superficies Cilíndricas:** Para una longitud anular “L” para condiciones de estado estacionario y con una conductividad térmica constante. Para este sistema se tiene la siguiente expresión:

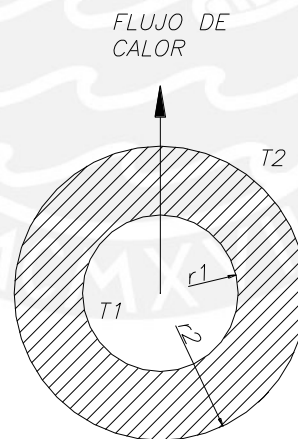


Figura N°4: Flujo de calor por conducción para superficies cilíndricas

$$q_x (W) = 2\pi Lk \times \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_2 / r_1)}$$

**2.1.2. Convección:** Se produce cuando un fluido en movimiento se pone en contacto con un sólido, ambos a diferentes temperaturas. Existen dos tipos de convección, la NATURAL y la FORZADA. La primera se da cuando hay una variación de temperatura

de un fluido en presencia del campo gravitacional, la segunda se da cuando la variación de temperaturas se da en presencia de agentes externos o fuerzas externas aplicadas sobre el sistema.

Para poder cuantificar la transferencia de calor por convección, se recurre a la “Ley del Enfriamiento” propuesta por Isaac Newton, la cual indica lo siguiente:

$$\dot{q}(W) = \alpha \times A \times (T_1 - T_2)$$

La determinación del coeficiente convectivo ( $\alpha$ ) no es sencillo, ya que depende de las condiciones geométricas de los cuerpos involucrados, la velocidad y el tipo de flujo, además de las propiedades termofísicas de los cuerpos.

El coeficiente convectivo para la CONVECCIÓN NATURAL, depende de los siguientes números adimensionales:

- Número de Grashof (Gr)
- Número de Nusselt (Nu)
- Número de Prandtl (Pr)

Para el caso de CONVECCIÓN FORZADA, el coeficiente convectivo depende de los siguientes números adimensionales:

- Número de Reynolds (Re)
- Número de Nusselt (Nu)
- Número de Prandtl (Pr)

### 2.1.3. Radiación

Esta forma de transferencia de calor se origina por la propagación de ondas electromagnéticas, que se origina por la interacción de cuerpos o sustancias que se encuentran a diferentes temperaturas absolutas. De todas las ondas que emite un cuerpo solo son aprovechadas una parte: las que se encuentran dentro del rango de RADIACIÓN TÉRMICA; en otras palabras, las que tienen una longitud de onda comprendida en el rango de 0.1 y 100 micras.

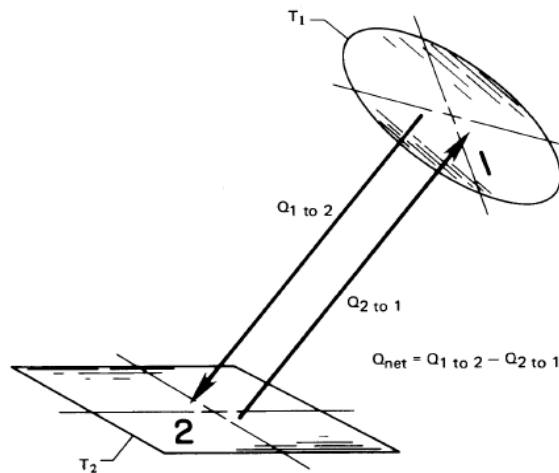


Figura N°5: Flujo de calor por radiación  
([LIBRO 3], página 520)

La forma de cuantificar la cantidad de calor transferida se realiza con la siguiente expresión:

$$q_{neto}^o (W) = A_1 \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4)$$

Donde:

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \text{ (Constante de Stefan-Boltzmann)}$$

Esta expresión es aplicada para radiadores ideales, usualmente denominados CUERPOS NEGROS, estos cuerpos emiten toda la cantidad de calor que pueden a la temperatura que se encuentran. Este tipo de cuerpos no existen en la realidad, pero si hay cuerpos que emiten una parte de la energía radiante de la energía que emitirían si es que fuesen un CUERPO NEGRO, a ese tipo de cuerpos se les denomina CUERPOS GRISES. Para el cálculo de ese flujo de calor se debe de considerar un factor denominado emisividad ( $\epsilon$ )

$$q_{neto}^o (W) = \epsilon \times A_1 \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4)$$

En vista que la mayoría de las veces, el cuerpo no es un cuerpo negro o gris, además que toda la radiación que emiten no es absorbida por el otro cuerpo debido a que

existen pérdidas durante el proceso, es necesario corregir la ecuación, por un factor que involucre tanto la corrección por la emisividad ( $F_\epsilon$ ) como la corrección de la posición geométrica de los cuerpos involucrados en el proceso. Entonces se tendría lo siguiente:

$$q_{neto}^o (W) = F_\epsilon \times F_{1-2} \times A_1 \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4)$$

Donde el factor de forma ( $F_{1-2}$ ) depende de la forma geométrica de los cuerpos involucrados y de la disposición geométrica de los mismos.

## 2.2. Confort Térmico

Una de las definiciones del confort térmico es dada por la norma ISO 7730, “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el medio ambiente” ([5]), es decir, se tiene que alcanzar una sensación de bienestar social, mental y físico; dicho confort depende de variables personales y del medio físico que nos rodea.

Con relación a los parámetros físicos, ya que son los que se pueden controlar, se debe de tener en cuenta la temperatura, humedad y velocidad del aire.

Con respecto a la velocidad del aire, se recomienda que ésta se encuentre entre 0 y 2m/s, pero para nuestro caso no será un problema ya que durante la época de bajas temperaturas, las personas mantienen las puertas cerradas, por ello el aire dentro de la habitación se encuentra en reposo.

Con respecto a la temperatura, existe un rango de temperaturas ya que algunos dan un valor de 20°C y otros 22°C (medidos a 1.25m de altura)

Con respecto a la humedad, mientras la temperatura del aire no sea elevada la humedad del aire no será elevada y , del otro lado, una baja humedad podría generar que las vías respiratorias se irriten. Por ello se recomienda que la humedad no baje del 25% ni que exceda del 65%. Durante el desarrollo de la presente tesis no se

tomará en cuenta el efecto de la humedad ya que sólo se ha fijado trabajar en el tema de temperaturas.

El Suelo Radiante posee una característica, que es mantener los pies calientes y la cabeza tibia lo cual no se consigue con los sistemas convencionales de calefacción como los radiadores, ya que estos hacen que el aire caliente se mantenga arriba y el aire frío abajo.



Fig.1.1 - Calefacción ideal

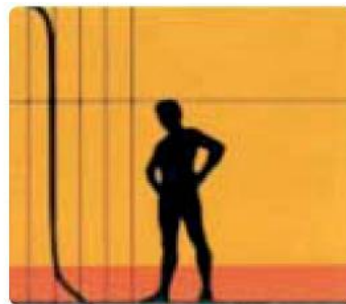


Fig.1.2 - Suelo radiante Uponor



Fig.1.3 - Radiadores



Fig.1.4 - Convectores

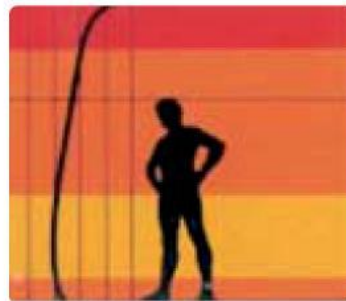


Fig.1.5 - Calefacción por techo

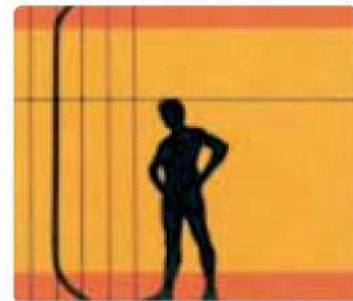


Fig.1.6 - Calefacción por pared

Figura N°6: Perfil de temperaturas de los distintos sistemas de calefacción  
([LIBRO 5], página 8)

### 2.3. Descripción del Suelo Radiante

Para el desarrollo del presente trabajo de tesis, se ha tenido en cuenta los distintos tipos de instalaciones de SUELO RADIANTE existentes en la actualidad. Dichas instalaciones han sido desarrolladas en el continente europeo, incluso existe una norma para poder hacer el cálculo de estos sistemas, la **UNE-EN 1264**.

Según esta norma, el Suelo Radiante se define como “Sistema de calefacción por el suelo, en el que los tubos, que transportan agua con o sin aditivos como fluido

calefactor, están ocultos bajo dicho suelo”. ([LIBRO 6], página 10). El agua es calentada, para luego ser transportada por las tuberías que se encuentran en el suelo, realizándose el intercambio de calor entre el agua y el mortero (convección y conducción), posteriormente se realiza el intercambio de calor entre el mortero (y el ambiente interior (convección y radiación). El mortero, según la Real Academia de la Lengua Española es *“un conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua, que puede contener además algún aditivo”*.

Este tipo de sistemas es muy utilizado en los lugares donde se registran temperaturas muy bajas como en los países nórdicos, Alemania y Suiza, donde es muy importante emplear sistemas que tengan bajo consumo de energía. Es por ello que este sistema no es muy conocido en nuestro país ya que no se tiene temperaturas muy frías (en la costa y selva) pero en la Sierra si se pueden registrar temperaturas muy bajas.

Este sistema no es nada nuevo ya que en el año XIII a.C. en Turquía, en la zona de Anatolia, se tenía un sistema de calefacción por suelo, el que estaba conformado por un conjunto de canales instalados construidos debajo del suelo. Años más tarde los romanos adoptaron este sistema, construyeron conductos por los cuales circulaban gases calientes, este tipo de sistemas fueron denominados como “Hypocausto”. (Ver Figura N°7)



Figura N°7 Vista en corte del Hypocausto ubicado en Normandía [8]



En la actualidad este sistema es muy empleado y desarrollado en el centro y norte de Europa, a tal punto de ser empleado en superficies no cubiertas para mantenerlas libres de hielo y nieve durante el invierno, como por ejemplo los campos de fútbol, donde es importante que se encuentren “limpios”.

Las ventajas y desventajas que presenta dicho sistema lo veremos a continuación:

Ventajas:

- Distribución ideal de temperaturas: Como se explicó en el punto del confort térmico, este sistema mantiene una temperatura “caliente” en la zona de los pies y una temperatura “fría” en la zona de la cabeza.
- Estética: Debido a que el Suelo Radiante se encuentra instalado dentro del piso, se contaría con un mayor espacio en la habitación.
- Saludable: Debido a que el aire no está lo suficientemente caliente como para crear corrientes de aire, por ello no se genera movimiento de polvo ni microorganismos.

Desventajas:

- Inercia térmica: Debido a que el sistema debe de calentar el pavimento y luego calentar el aire, toma más tiempo que los sistemas que calientan directamente el aire.
- Elevación del suelo: Debido a que debajo del suelo debe de haber una placa aislante, las tuberías y además alrededor de 8cm de pavimento, esto hace que el sistema tenga unos 8 ó 10cm de elevación que un suelo convencional.

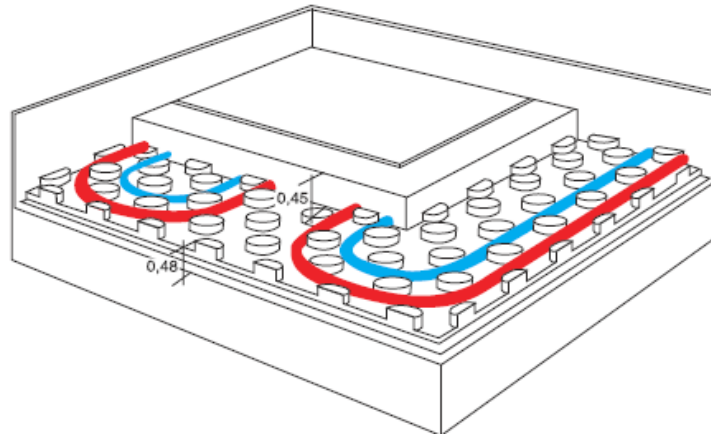


Figura N°8: Corte de una instalación de Suelo Radiante  
([LIBRO 6], página 13)

- Mayor costo de instalación: Debido a que el sistema necesita de mucho más accesorios que los demás sistemas, este costo puede ser un 15% más, pero a su vez este sistema tiene un tiempo de vida de alrededor de 10 años.

Estos sistemas están conformados básicamente por cuatro componentes: suministro de energía, sistema de tuberías, el sistema de circulación y el aislamiento térmico

### 2.3.1. Suministro de Energía

Referido a la forma de aportar la energía necesaria para aumentar la temperatura del agua, la cual circula por las tuberías y el incremento de temperatura en el interior de la habitación. Existen diversas formas de poder calentar el fluido, como se muestra a continuación:

- **Caldera eléctrica:** Es la forma más sencilla de calentar el agua, debido a los avanzados sistemas de control que existen para este tipo de tecnologías, teniendo una debilidad en los precios de las tarifas eléctricas, que hacen esta forma una de las más caras.
- **Sistema de aprovechamiento de gases de escape:** Es una forma económica y ecológica de aprovechar la energía que poseen los gases de escape de una

cocina para poder aumentar la temperatura del agua; para ello es necesario un adecuado diseño de un intercambiador de calor. La desventaja de este sistema radica en la cantidad de energía necesaria para calentar todo el sistema, ya que quizás esta forma no pueda cubrir toda la demanda energética requerida; por ello, este sistema es empleado como un sistema de apoyo en caso el aporte energético principal sea deficiente.

- **Caldera de gas:** Es una forma económica para poder brindar la cantidad de energía necesaria para calentar el agua, la desventaja de este tipo de sistemas radica en los gases de escape que se generan ya que estos contaminan nuestro medio ambiente.
- **Energía solar:** Es la forma más económica y más limpia de poder calentar el agua necesaria para el sistema de SUELO RADIANTE, la desventaja de este sistema radica en la cantidad de energía que se pueda recolectar del Sol, por ello, muchas veces se necesita de un sistema adicional para poder mantener el sistema encendido durante las 24 horas.

### 2.3.2. Sistema de Tuberías

Está conformado por una red de tuberías distribuidas para poder transferir de manera adecuada el calor, existen tres formas de hacer las instalaciones las cuales son las siguientes:

- **Distribución en serpentin:** Es la forma más sencilla de hacer la distribución, pero la desventaja de este sistema radica en la gran diferencia de temperaturas que existe entre la salida y la entrada del agua de circulación; esto puede hacer que el usuario sienta esa diferencia en el ambiente en el que se encuentra.



Figura N°9: Distribución en serpentin [4]

- **Distribución en doble serpentin:** A diferencia que la distribución en serpentin, ésta no genera una gran diferencia de temperaturas entre la entrada y salida, ya que siempre va una tubería más fría con una más caliente, compensando la diferencia de temperaturas que se tenía en la distribución anterior. La desventaja de este sistema se genera al momento de dar la forma a la distribución ya que a veces se tiene que formar radios muy pequeños que dificultan la instalación.

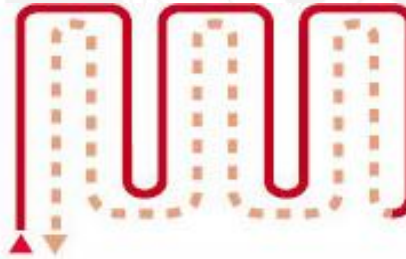


Figura N°10: Distribución en doble serpentin [4]

- **Distribución en espiral:** Al igual que la distribución en doble serpentin, esta no genera una notoria diferencia de temperaturas en la habitación, además no se generan radios pequeños en el momento de la instalación, por ello, este tipo de instalaciones es la recomendada para los SUELOS RADIANTES.

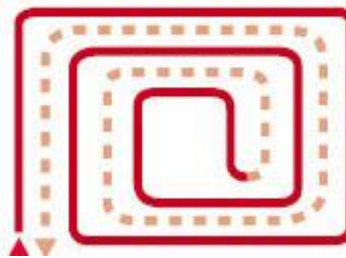


Figura N°11: Distribución en espiral [4]

El material que se emplea en las tuberías puede ser cobre o de hierro, en la actualidad se emplea un material termoestable, denominado PEX, que da mejores resultados debido a que es un aislante. Sus propiedades térmicas son mostradas en la tabla siguiente:

**Tabla 1: Propiedades térmicas del PEX**

Propiedad térmica	Temperatura de medición	Valor	Unidad	Norma
Rango de T° servicio	-	100-110	°C	-
Coefficiente de expansión lineal	a 20°C	14	m/m°C	-
Coefficiente de expansión lineal	a 100°C	20.5	m/m°C	-
Calor específico	-	2.3	kJ/kg°C	-
Coefficiente de efectividad térmica		0.35	W/m°C	DIN 4725

Fuente: [http://www.recal.cl/pexwirsbo\\_propiedades\\_pex.html](http://www.recal.cl/pexwirsbo_propiedades_pex.html)

### 2.3.3. Componentes

En el Suelo Radiante son importantes algunos componentes adicionales para que éste funcione y se pueda controlar de manera adecuada. Los componentes más importantes del Suelo Radiante son: la bomba, sistema de distribución, válvula reguladora y los purgadores

- **Bomba:** Es la responsable de hacer circular el agua a través de las tuberías que se encuentran instaladas bajo el suelo. Esta bomba no consume mucha potencia pero debe de seleccionarse una que sea capaz funcionar con agua caliente, ya que hay que recordar que la temperatura de entrada al sistema está alrededor de 40°C.
- **Sistema de Distribución:** Es el encargado de distribuir el agua caliente que viene de la fuente hacia los distintos sistemas instalados en la edificación y a la vez recoger el agua fría que sale de los distintos sistemas. Tal como se puede observar, en la Figura N°11, el sistema de distribución cuenta con dos ramales, uno es para distribuir el agua caliente y la otra es para recolectar el agua fría.



Figura N°12: Sistema de Distribución [LIBRO 6, página19]

- **Válvula reguladora:** Esta válvula es importante para regular el aporte calorífico a la habitación donde ha sido instalado el Suelo Radiante, en caso el ambiente esté muy caliente ésta debe de cerrarse un poco; en cambio si el ambiente está un poco frío debe de abrirse. Esta parte puede ser automatizada, de modo que, una termocupla pueda medir la temperatura de la habitación y para que luego un controlador ordene abrir o cerrar un poco la válvula, según sea el caso.



Figura N°13: Sistema de Distribución [LIBRO 6, página 19]

- **Purgadores:** Es un dispositivo de seguridad, el cual se encarga de evacuar el aire del sistema.



Figura N°14: Sistema de Distribución [LIBRO 6, página 20]

## 2.4. Descripción del lugar de instalación

### 2.4.1. Datos Geográficos

La presente tesis se desarrollará para una casa en el poblado de Langui. Este poblado se encuentra ubicado en la provincia de Canas, Cuzco, a 3969 msnm; a las orillas de una laguna que lleva el mismo nombre del poblado (ver Figura N°15), la cual modifica su clima (se verá más adelante las temperaturas registradas en dicho poblado).



Figura N°15: Ubicación de Langui en el departamento del Cuzco [9]

Actualmente, la casa está construida, pero no alrededor de la laguna sino a unos 500 metros en una pequeña loma (ver Figura N°16)



*Figura Nº16: Casa ecológica ubicada en Langui*

[LIBRO 7]

La casa se encuentra orientada en dirección Norte-Sur para aprovechar de una mejor manera los rayos solares y de manera indirecta la dirección de los vientos, que se dirigen en las direcciones Nor-Oeste a Sur-Oeste. Para verlo de una manera más sencilla, la ubicación, respecto a los puntos cardinales, es la siguiente:



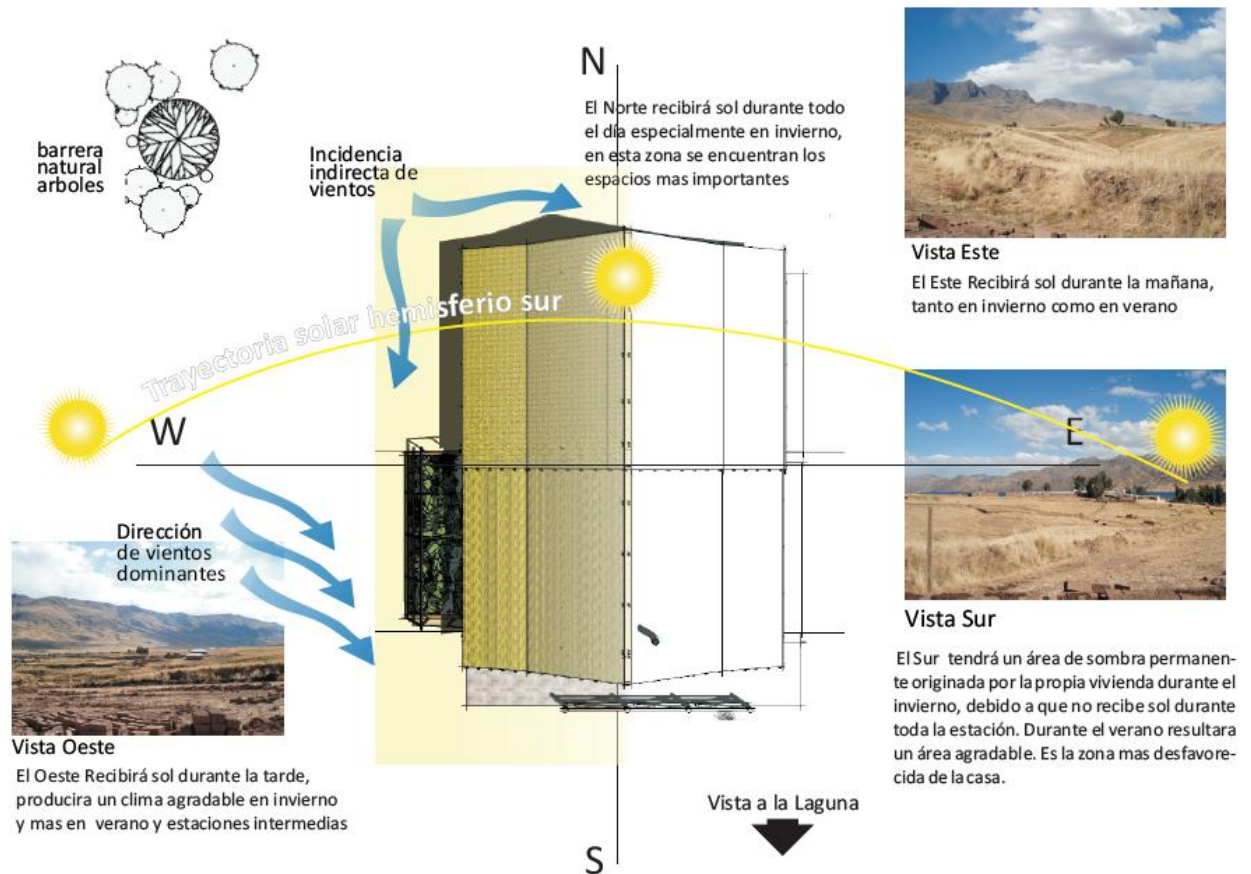


Figura Nº17: Vista de planta de la casa ecológica  
[LIBRO 7]

#### 2.4.2. Datos Climáticos

El poblado de Langui es un lugar que posee unas condiciones muy desfavorables durante el invierno debido a que se produce el fenómeno de friaje haciendo que las temperaturas disminuyan considerablemente durante un corto período de tiempo, registrándose las siguientes temperaturas durante el año:

**Tabla 2: Valores de temperatura en Sicuani (extraído del SENAMHI)**

Meses	Temperatura de día (°C)	Temperatura de noche (°C)
Enero	13.5	-3
Febrero	20	-1
Marzo	13	-2
Abril	13	-6
Mayo	14	-11
Junio	15	-14
Julio	13	-14
Agosto	14	-17
Setiembre	23	-13
Octubre	23	-7
Noviembre	23	-2
Diciembre	20	0

Estos datos han sido tomados de las estación metereológica de SICUANI que si bien es cierto no son los de Langui pero los climas son similares.

Con respecto a la radiación, la cual es importante para el desarrollo de esta tesis, podemos observar que la localidad posee una radiación considerablemente buena, por ello va a ser aprovechada para obtener la energía necesaria para que funcione nuestro sistema. El mapa promedio de radiación solar se muestra a continuación



Figura N°18: Mapa solar del Perú, incidencia diaria promedio  
(Brindado por el GRUPO-PUCP)

### 2.4.3. Descripción de la Vivienda

La casa para la cual va a ser diseñado el Suelo Radiante, es una casa modelo que ha sido construida con adobe mejorado y será empleada como un centro de capacitación para los pobladores donde aprenderán acerca de las diversas tecnologías que tienen como fuente energética las energías renovables. Esta casa, denominada Casa Ecológica Andina PUCP, está construida con materiales fáciles de conseguir por los pobladores, para que de esa manera puedan elaborarlos ellos mismos o con la mínima ayuda requerida.

La casa ecológica construida tiene la siguiente vista de planta (ver Figura N°19)

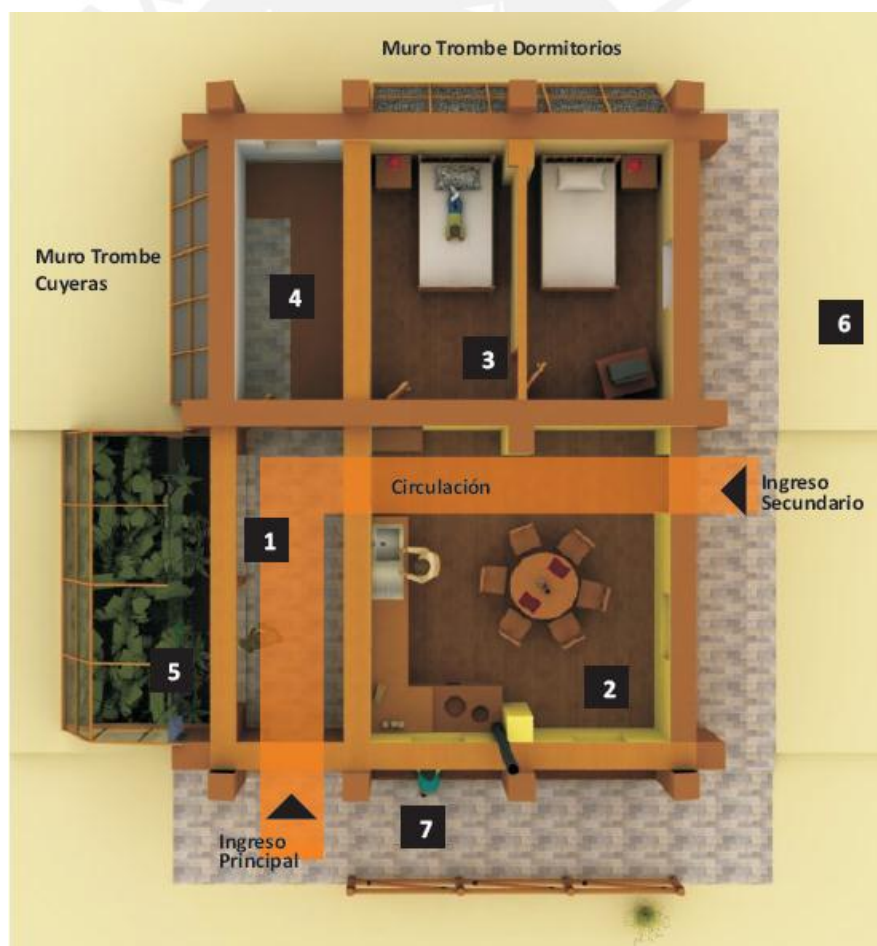


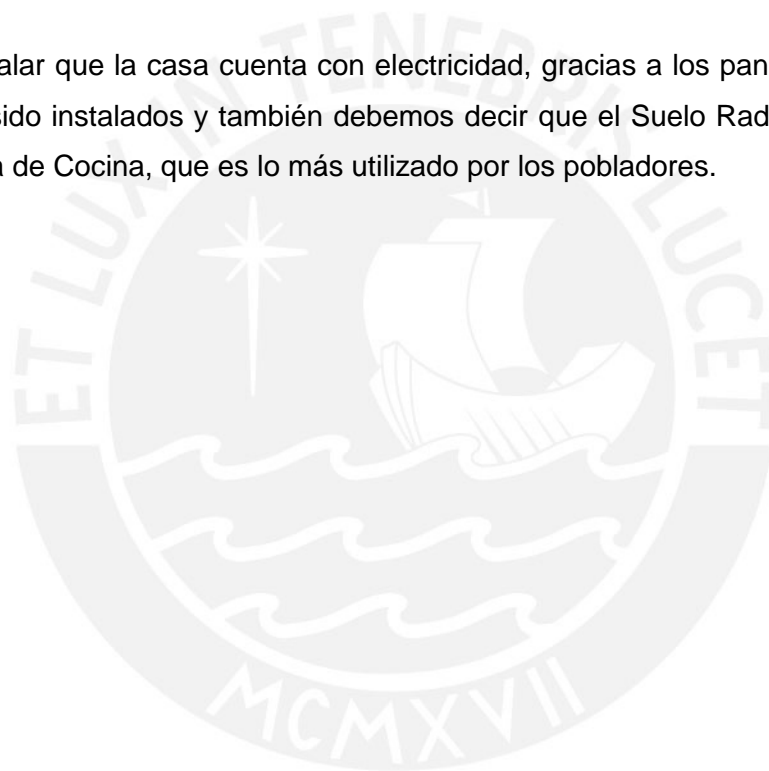
Figura N°19: Mapa Distribución de la casa ecológica

[LIBRO 7]

Donde:

- 1: Vestíbulo
- 2: Cocina (cocinas mejoradas)
- 3: Dormitorios (muro trombe)
- 4: Cuyeras mejoradas
- 5: Invernadero
- 6: Baño (Terma Solar)
- 7: Mirador

Cabe señalar que la casa cuenta con electricidad, gracias a los paneles fotovoltaicos que han sido instalados y también debemos decir que el Suelo Radiante se instalará en la zona de Cocina, que es lo más utilizado por los pobladores.



### CAPÍTULO 3 DISEÑO Y CÁLCULOS

Para realizar un adecuado diseño del sistema, se va a seguir el procedimiento recomendado en los cursos de PROYECTO DE INGENIERÍA MECÁNICA 1 y 2.

#### 3.1. Metodología

El desarrollo de la presente tesis se basa en la metodología aprendida en los cursos de diseño. Siendo más específico, se va a realizar de la siguiente manera:

1. Caracterización del lugar donde se va a aplicar la tesis, condiciones geográficas, climatológicas y sociales.
2. Búsqueda de información de los tipos de suelos radiantes existentes, las formas constructivas, materiales y elementos que emplean para la construcción de cada tipo de suelo radiante.
3. Realización de la estructura de funciones, para identificar los distintos procesos que intervienen en el desarrollo del proyecto.
4. Elaboración de la matriz morfológica.
5. Bosquejo de los conceptos de solución, teniendo en cuenta las estructuras de funciones y matriz morfológica, para luego pasar a seleccionar el que mejor se adecua a las necesidades planteadas.
6. Bosquejo de los proyectos preliminares, teniendo en cuenta el concepto de solución seleccionado, para realizar la ponderación correspondiente y seleccionar el "PROYECTO PRELIMINAR OPTIMO"

7. Teniendo el “PROYECTO PRELIMINAR ÓPTIMO”, se realizarán los cálculos preliminares para conocer, de manera general, la dimensión del proyecto.
8. Al término de los cálculos preliminares, se procederá a realizar los cálculos finales para poder tener los elementos, materiales y dispositivos que se van a emplear para comenzar a realizar los planos, tanto de ensamble como de despiece.



### 3.2. Lista de Exigencias

En primer lugar elaboraremos la lista de exigencias:

**Tabla 3: Lista de Exigencias**

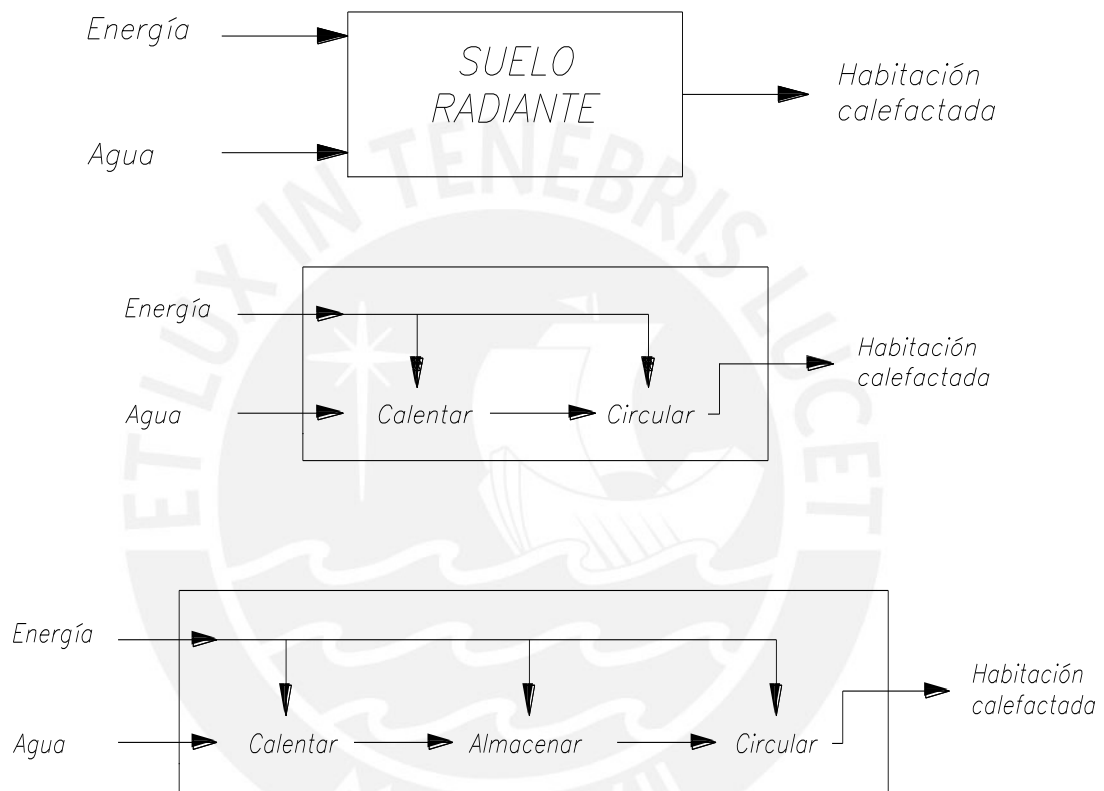
LISTA DE EXIGENCIAS			Pág. 1 de 2
			Edición: Rev. 1.
<b>PROYECTO</b>	DISEÑO DE SUELO RADIANTE PARA ZONAS RURALES		Fecha: 22/08/08
			Revisado: Miguel Hadzich
<b>CLIENTE</b>	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		Elaborado: Davy Olivera Oliva
Fecha	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
22/08/08	E	<p><b>Función principal:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener una temperatura de 17°C en una sala que posee un área de 12m<sup>2</sup> que se encuentra ubicada a 4000msnm en el distrito de Langui en Cuzco, a partir de las 5:30pm hasta las 8pm (aproximadamente)</li> </ul>	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>ENERGÍA:</b> El sistema deberá ser eficiente energéticamente, para ello se empleará la energía solar para su funcionamiento.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>GEOMETRIA:</b> El sistema deberá ocupar el menor espacio posible.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>SEGURIDAD:</b> Deberá diseñarse de manera que no se ponga en riesgo la integridad física de los usuarios, siguiendo normas de seguridad en el diseño. Además se deberán tomar consideraciones para no dañar el sistema ni el medio ambiente.	Davy Olivera Oliva



22/08/08	E	<b>FABRICACIÓN:</b> El sistema deberá poder fabricarse con materiales y maquinaria disponible en el medio local.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>MONTAJE:</b> El sistema deberá ser de fácil montaje y desmontaje.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	D	<b>MANTENIMIENTO:</b> Los elementos deberán estar instalados de manera que se permita el fácil acceso a ellos por motivo de mantenimiento.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>COSTOS:</b> El sistema a desarrollar tendrá en el costo total un factor muy importante, por ello debemos de pensar en un sistema que trate de ahorrar lo máximo posible.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>PLAZOS:</b> El proyecto final deberá entregarse el día 27 de noviembre del 2008.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>TRANSPORTE:</b> El sistema deberá ser de fácil transporte para su posterior montaje.	Davy Olivera Oliva
22/08/08	E	<b>ERGONOMÍA:</b> El sistema debe de ser de fácil manejo y entendimiento para el usuario. El sistema será manual.	Davy Olivera Oliva

### 3.3. Estructura de Funciones






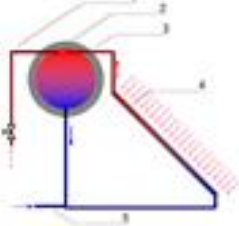




Teniendo en cuenta la lista de exigencias se puede empezar a elaborar la “Estructura de Funciones” del sistema:



Como se puede observar, la última “Estructura de Funciones” es la más detallada y la que mejor se adapta para solucionar el problema. Con esto se puede proceder a elaborar los “Conceptos de Solución”.

3.4. Matriz Morfológica

Tabla 4: Matriz Morfológica

<b>Función</b>			
<b>Calentar</b>	<p>Caldera</p> 	<p>Colector cilindrico</p> 	<p>Colector plano</p> 
<b>Almacenar</b>	<p>Tanque</p> 		
<b>Circular</b>	<p>Bomba eléctrica</p> 	<p>Efecto Termosifón</p> 	<p>Manual</p> 
<b>Fuente de energía para la circulación</b>	<p>Panel solar</p> 	<p>Turbina eólica</p> 	<p>Turbina hidráulica</p> 

Flecha color azul: Concepto de Solución N°1

Flecha color rojo: Concepto de Solución N°2

Flecha color verde: Concepto de Solución N°3

### 3.5. Conceptos de Solución

Tomando como base la Estructura de Funciones seleccionada, se procede a hacer realizar unos bosquejos de posibles soluciones para evaluarlas y poder escoger la mejor opción.

Concepto de Solución 1:

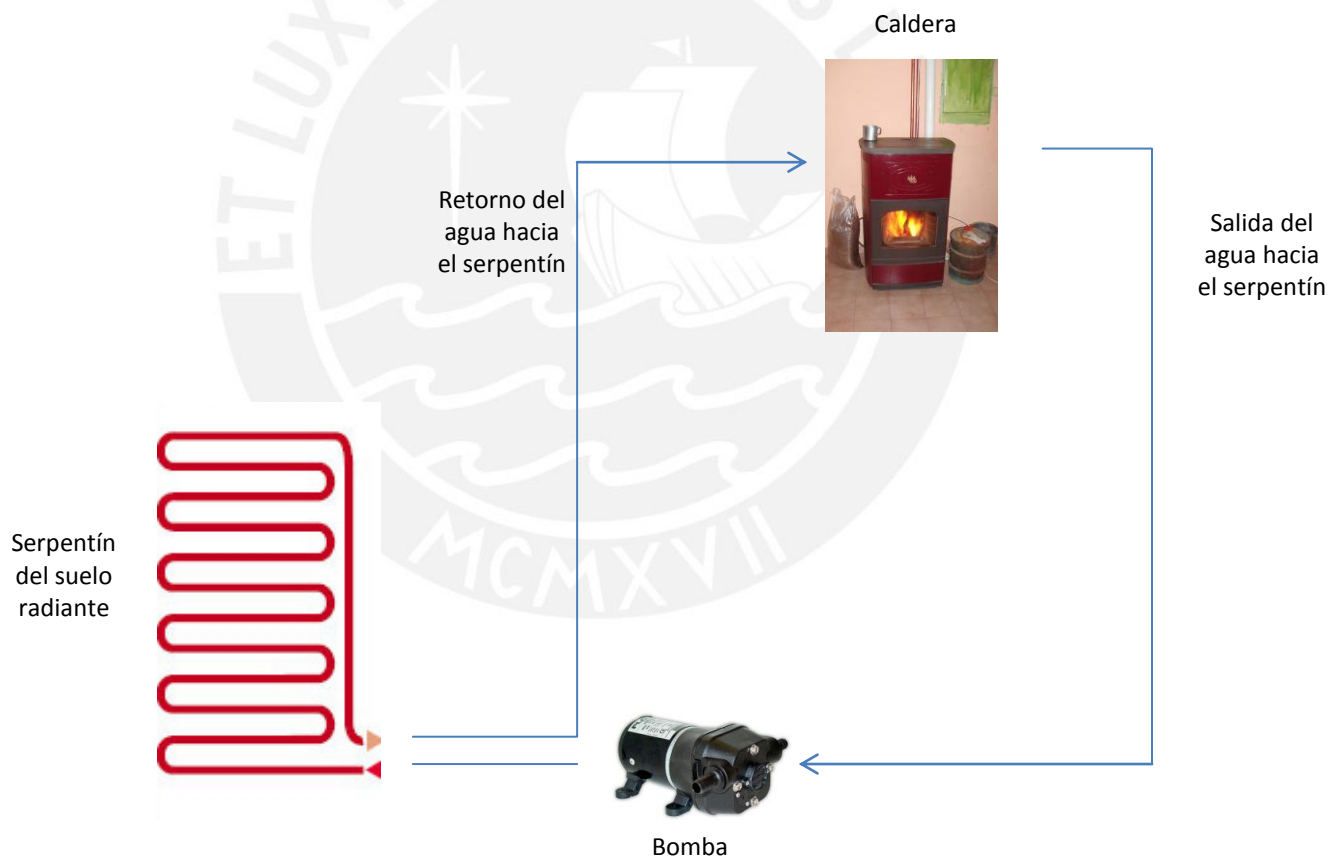


Figura N°20: Concepto de Solución 1

Se hace circular agua caliente gracias a la acción de una bomba, el agua es calentada gracias a una pequeña caldera.

Concepto de Solución 2:

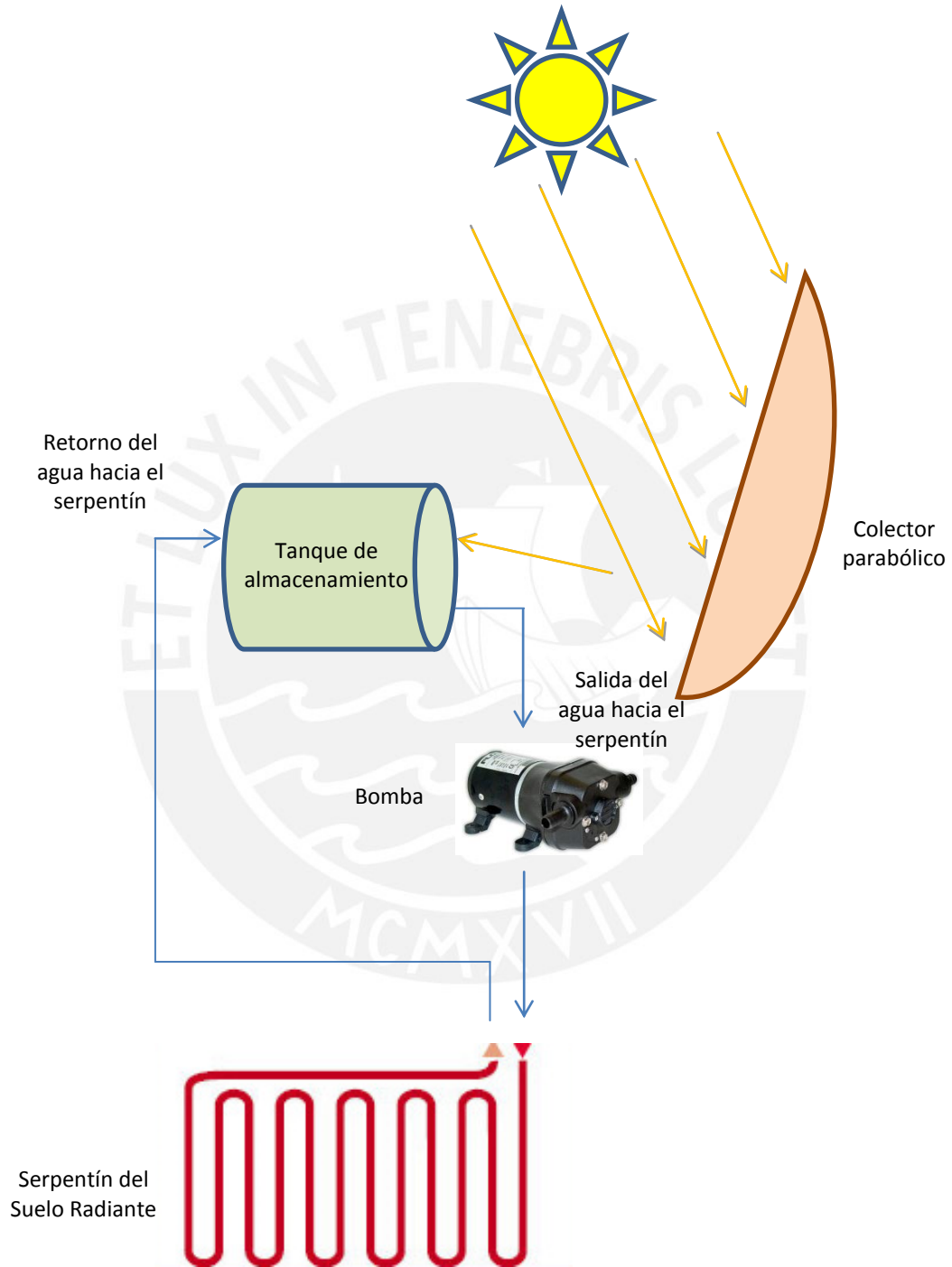


Figura N°21: Concepto de Solución 2

El agua es calentada durante todo el día por medio de un colector cilíndrico, es almacenada en un tanque aislado térmicamente. El agua es empleada en las horas frías (noche) y circula por la tubería gracias a la acción de una bomba.

Concepto de Solución 3:

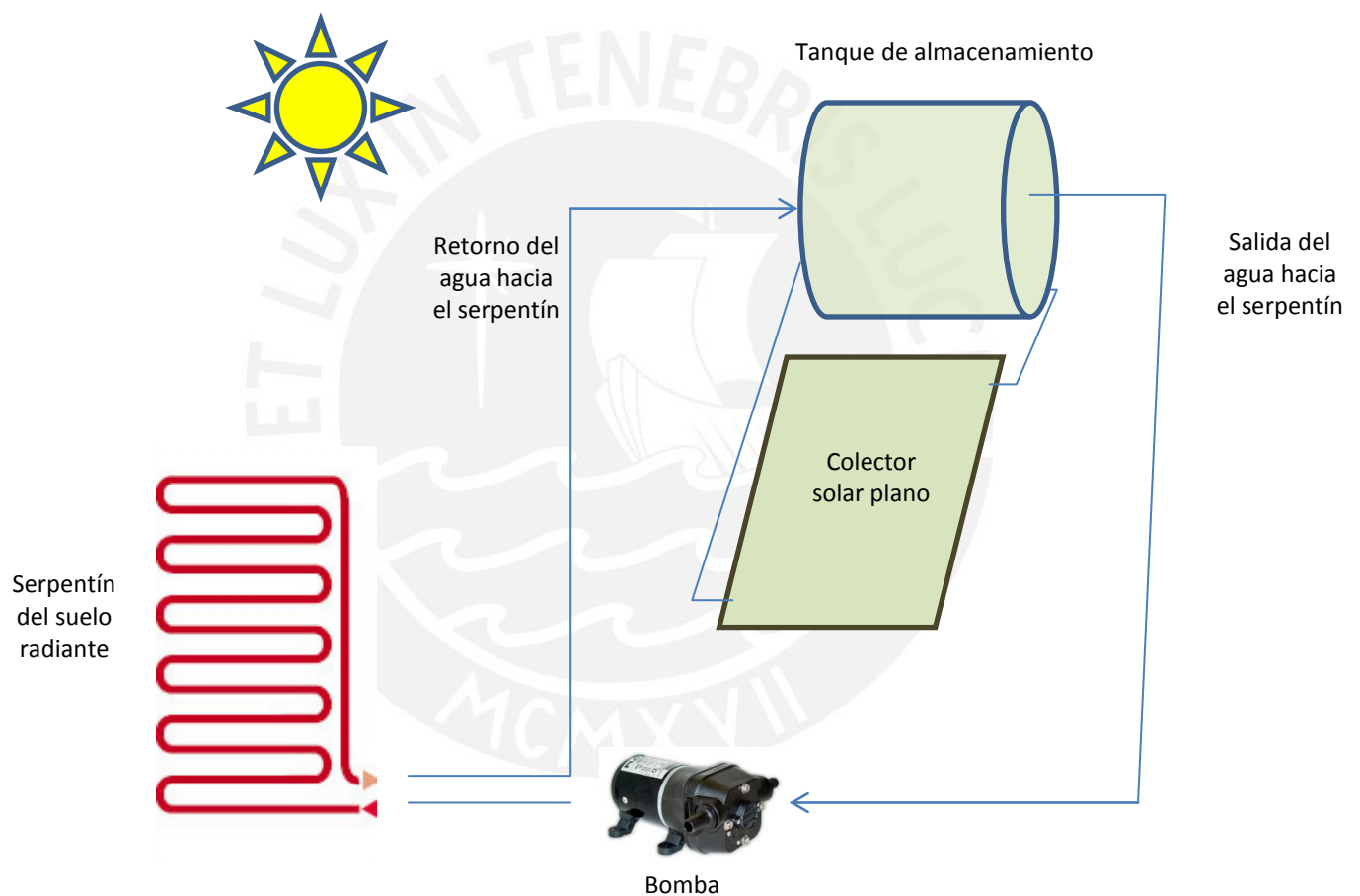


Figura N°22: Concepto de Solución 3

El agua es calentada durante todo el día por medio de un colector plano, es almacenada en un tanque aislado térmicamente. El agua es empleada en las horas frías (noche) y circula por la tubería gracias a la acción de una bomba.

Evaluación:

**Tabla 5: Evaluación de los Conceptos de Solución**

Propiedad Técnica	PROYECTOS			
	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución ideal
Función	3	3	3	4
Diseño	2	2	3	4
Seguridad	2	1	3	4
Montaje	2	2	2	4
Rapidez	2	2	2	4
Estabilidad	2	2	3	4
Facilidad de manejo	2	1	3	4
TOTAL	15	13	19	28

Teniendo en cuenta que el Concepto de Solución 3 es el que ofrece mejores condiciones, se procede a hacer el “Proyecto Preliminar” para luego poder evaluar el que mejores condiciones brinde y poder hacer el diseño según corresponda.

### 3.6. Proyectos Preliminares y Proyecto Óptimo

Para el desarrollo de los proyectos preliminares se toma como base los Conceptos de Solución, para poder encontrar el proyecto que más se ajuste a nuestras necesidades y poder dimensionarlo. Para ello se presenta las siguientes tres opciones, estas tres opciones poseen en común la forma de regular el sistema que es la siguiente: En la tarde-noche (alrededor de las 5:30 pm) el usuario debe abrir la válvula de globo y posteriormente accionar la bomba. Si es que hay demasiada temperatura en el interior de la casa el usuario debe de cerrar un poco más la válvula, en caso el ambiente esté muy frío deberá abrir más la válvula. Para apagar el sistema el usuario debe apagar la bomba.

A continuación se muestra los diferentes sistemas:

## Proyecto Preliminar 1:

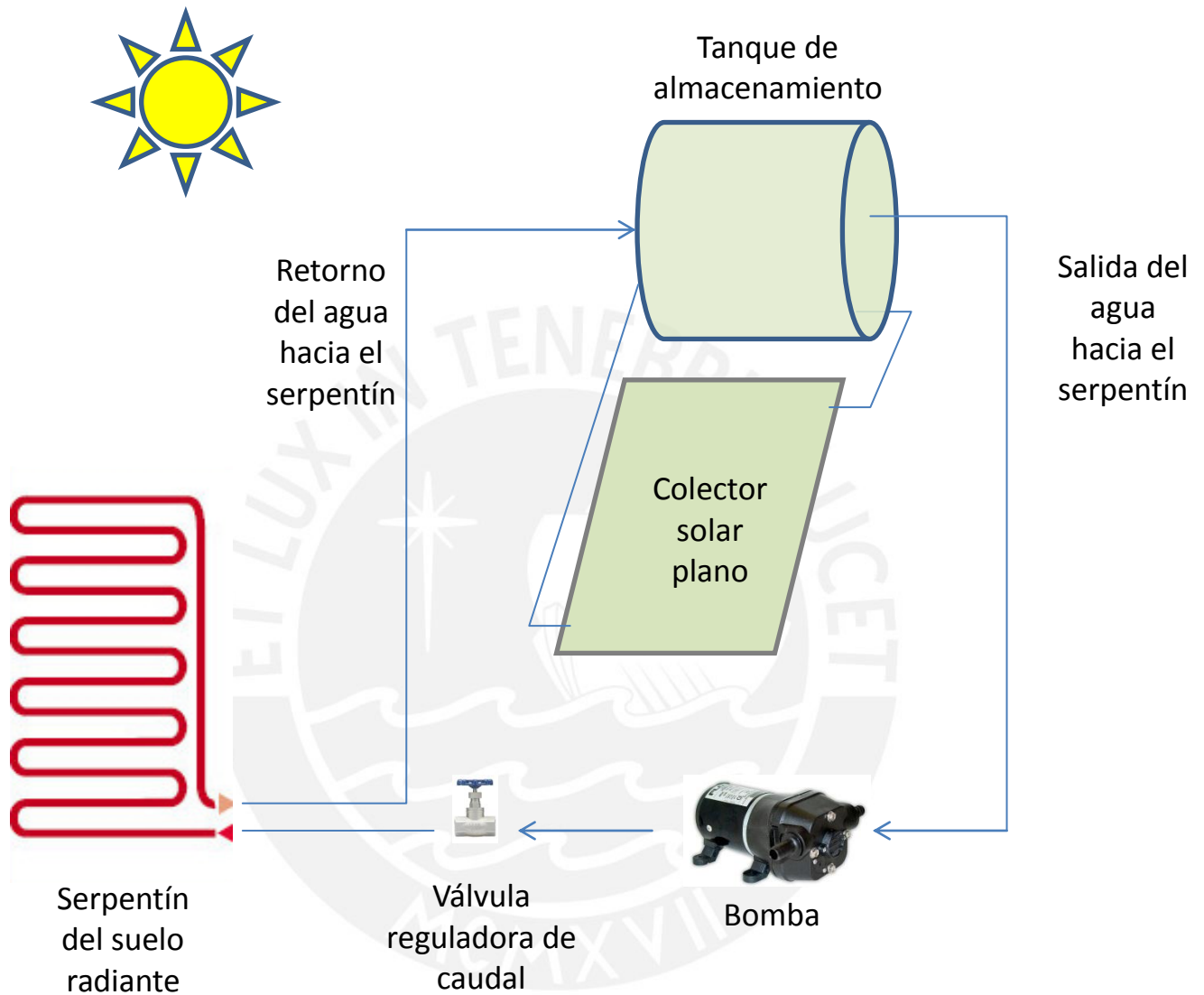


Figura N°23: Proyecto Preliminar 1

El sistema emplea el colector solar plano para calentar el agua, gracias a la radiación solar de la zona, durante todo el día. Gracias al efecto termosifón logramos aumentar la temperatura del agua para poder aprovecharla en la tarde para poder calentar nuestro sistema.



## Proyecto Preliminar 2:

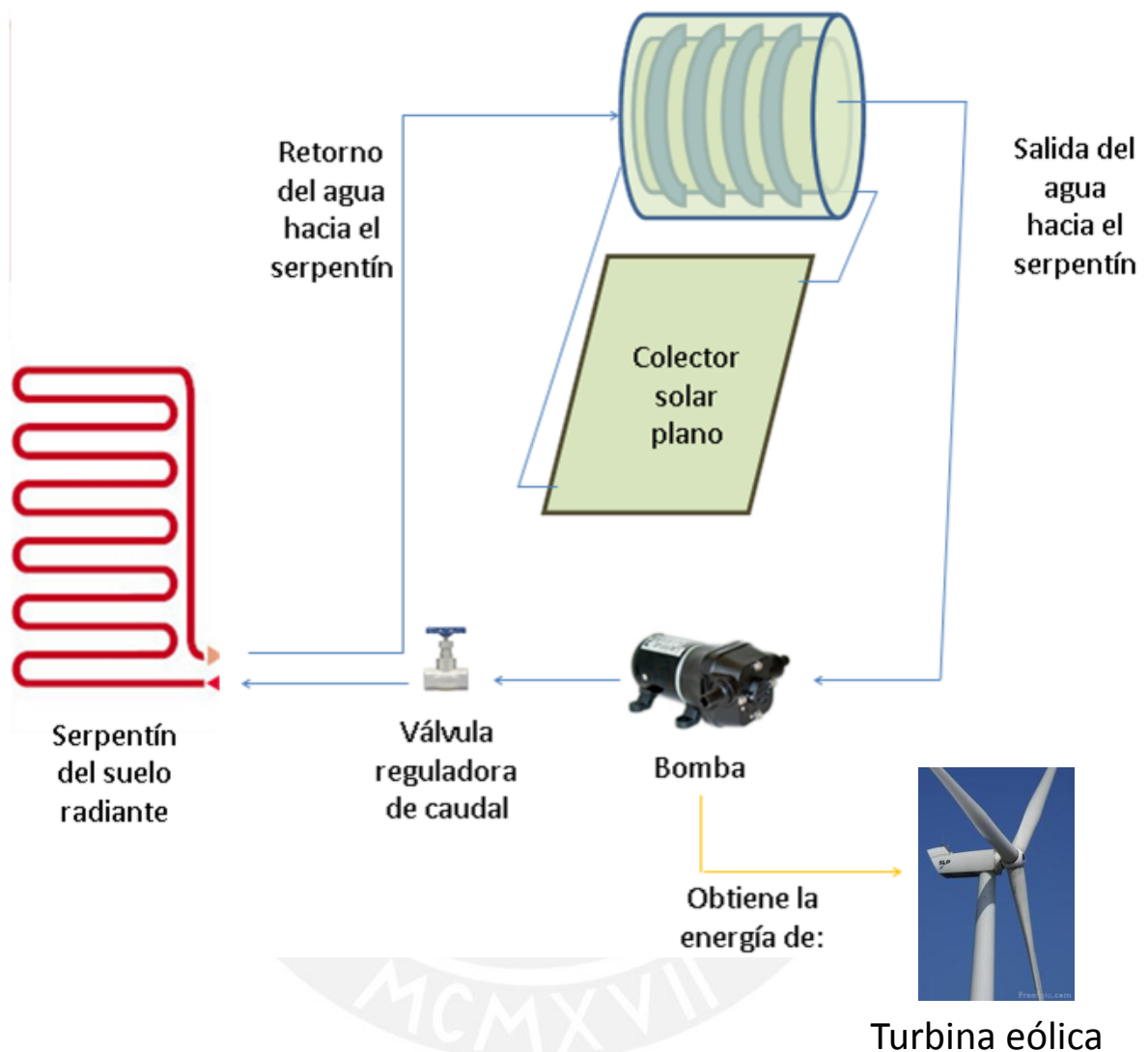


Figura N°24: Proyecto Preliminar 2

El sistema emplea el colector solar plano para calentar el agua, este colector solar posee dos zonas, una es la zona donde un refrigerante que va a aumentar su temperatura y gracias a un intercambiador de calor que se encuentra dentro del tanque de almacenamiento logramos aumentar la temperatura del agua, la cual se encuentra en la segunda zona (ver 3.7.3)

Proyecto Preliminar 3:

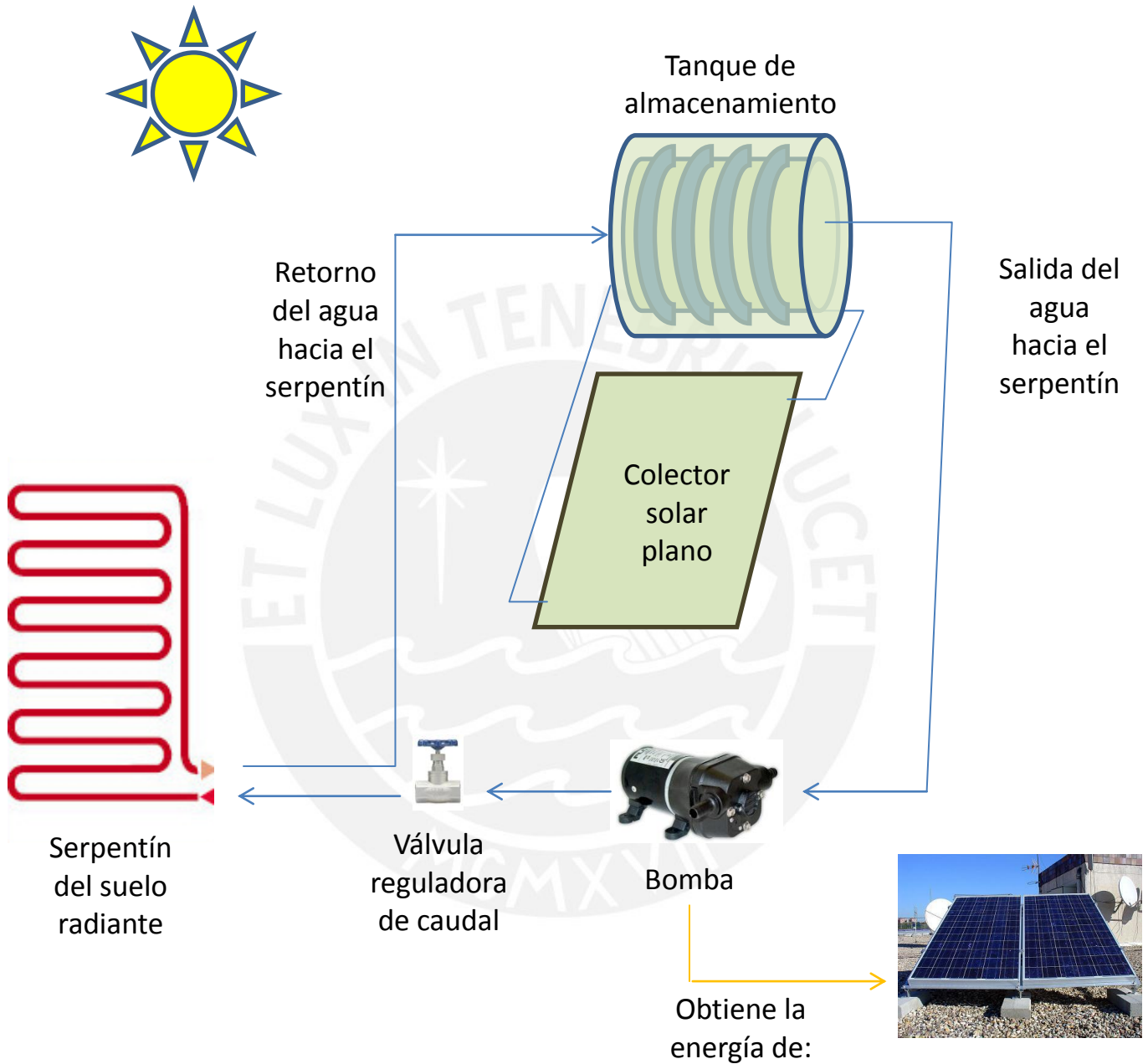


Figura N°25: Proyecto Preliminar3

El sistema emplea el colector solar plano para calentar el agua, este colector solar posee dos zonas, una es la zona donde un refrigerante que va a aumentar su temperatura y gracias a un intercambiador de calor que se encuentra dentro del tanque de almacenamiento logramos aumentar la temperatura del agua, la cual se encuentra en la segunda zona. Para ver con mayor detalle el sistema de instalación

ver el PLANO DE DISPOSICIÓN del sistema que se encuentra anexo, para que el sistema funcione de la manera adecuada hay que seguir los siguientes pasos:

- a.- En la mañana, abrir las dos válvulas superiores, para que el agua pueda calentarse durante el día, ver DETALLE C del PLANO DE DISPOSICIÓN.
- b.- Llegada la tarde, cuando se necesita hacer funcionar el sistema, se debe abrir la inferior, ver DETALLE C del PLANO DE DISPOSICIÓN.
- c.- Abrir la válvula que se encuentra a la salida de la bomba, ver DETALLE B del PLANO DE DISPOSICIÓN, para garantizar el cebado de la bomba.
- d.- Cerrar la válvula superior izquierda, ver DETALLE C del PLANO DE DISPOSICIÓN.
- e.- Finalizado todo el proceso, apagar la bomba y cerrar la válvula que se encuentra a la salida de la bomba.

Las evaluaciones, tanto técnicas como económicas, se harán a continuación siguiendo los parámetros de la norma VDI 2225

**Tabla 6: Evaluación Económica de los Proyectos Preliminares**

DISEÑO MECÁNICO - EVALUACIÓN DE PROYECTOS PRELIMINARES										
Valor Económico (yi)										
Criterios de Evaluación para diseños en fase de conceptos ó proyectos										
Variantes de Concepto/Proyecto			PROYECTOS							
			PROYECTO PRELIMINAR 1		PROYECTO PRELIMINAR 2		PROYECTO PRELIMINAR 3		SOLUCION IDEAL	
Nº	Criterios	g	p	g*p	p	g*p	P	g*p	p	g*p
1	Fabricación	4	3	12	3	12	3	12	4	16
2	Mantenimiento	3	3	9	3	9	3	9	4	12
3	Operación	3	2	6	2	6	3	9	4	12
4	Mano de obra	2	2	4	2	4	2	4	4	8
5	Material	3	3	9	2	6	3	9	4	12
6	Tecnología	2	3	6	2	4	3	6	4	8
	<b>TOTAL</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>46</b>	<b>14</b>	<b>41</b>	<b>17</b>	<b>49</b>	<b>24</b>	<b>68</b>
	Valor económico		0.66	0.67	0.58	0.60	0.70	0.72	1	1
	Orden			2		3		1		

$$x_i = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{np_{\max}} = \frac{\frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n}}{p_{\max}} = \frac{p}{p_{\max}} \leq 1$$

$$x_i = \frac{g_1 p_1 + g_2 p_2 + g_3 p_3 + \dots + g_n p_n}{(g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n) p_{\max}} \leq 1$$

**Tabla 7: Evaluación Técnica de los Proyectos Preliminares**

DISEÑO MECÁNICO - EVALUACIÓN DE PROYECTOS PRELIMINARES										
Valor Técnico (xi)										
Criterios de Evaluación para diseños en fase de conceptos ó proyectos										
Variantes de Concepto/Proyecto			PROYECTOS							
			PROYECTO PRELIMINAR 1		PROYECTO PRELIMINAR 2		PROYECTO PRELIMINAR 3		SOLUCION IDEAL	
Nº	Criterios	g	p	g*p	p	g*p	P	g*p	p	g*p
1	Función	4	2	8	4	16	4	16	4	16
2	Forma	3	2	6	4	12	3	9	4	12
3	Diseño	4	3	12	3	12	3	12	4	16
4	Seguridad	4	1	4	2	8	4	16	4	16
5	Ergonomía	2	1	2	2	4	3	6	4	8
6	Fabricación	3	3	9	3	9	3	9	4	12
7	Montaje	2	3	6	2	4	2	4	4	8
8	Transporte	2	3	6	2	4	2	4	4	8
9	Uso	2	3	6	3	6	3	6	4	8
	<b>TOTAL</b>	<b>26</b>	<b>21</b>	<b>59</b>	<b>25</b>	<b>75</b>	<b>27</b>	<b>82</b>	<b>36</b>	<b>104</b>
	Valor técnico		0.58	0.56	0.69	0.72	0.75	0.78	1	1
	Orden			3		2		1		

$$x_i = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{np_{\max}} = \frac{\frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n}}{p_{\max}} = \frac{p}{p_{\max}} \leq 1$$

$$x_i = \frac{g_1 p_1 + g_2 p_2 + g_3 p_3 + \dots + g_n p_n}{(g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n) p_{\max}} \leq 1$$

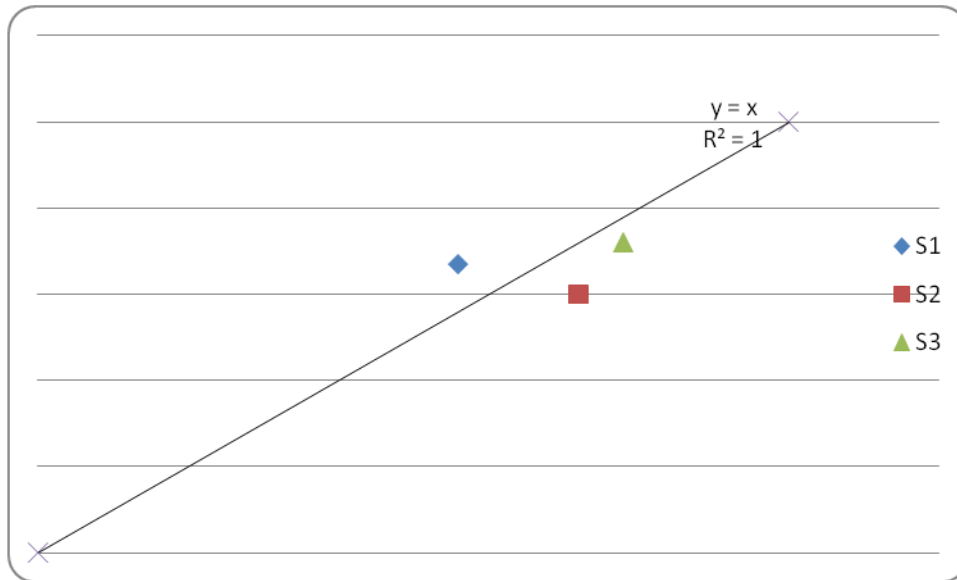
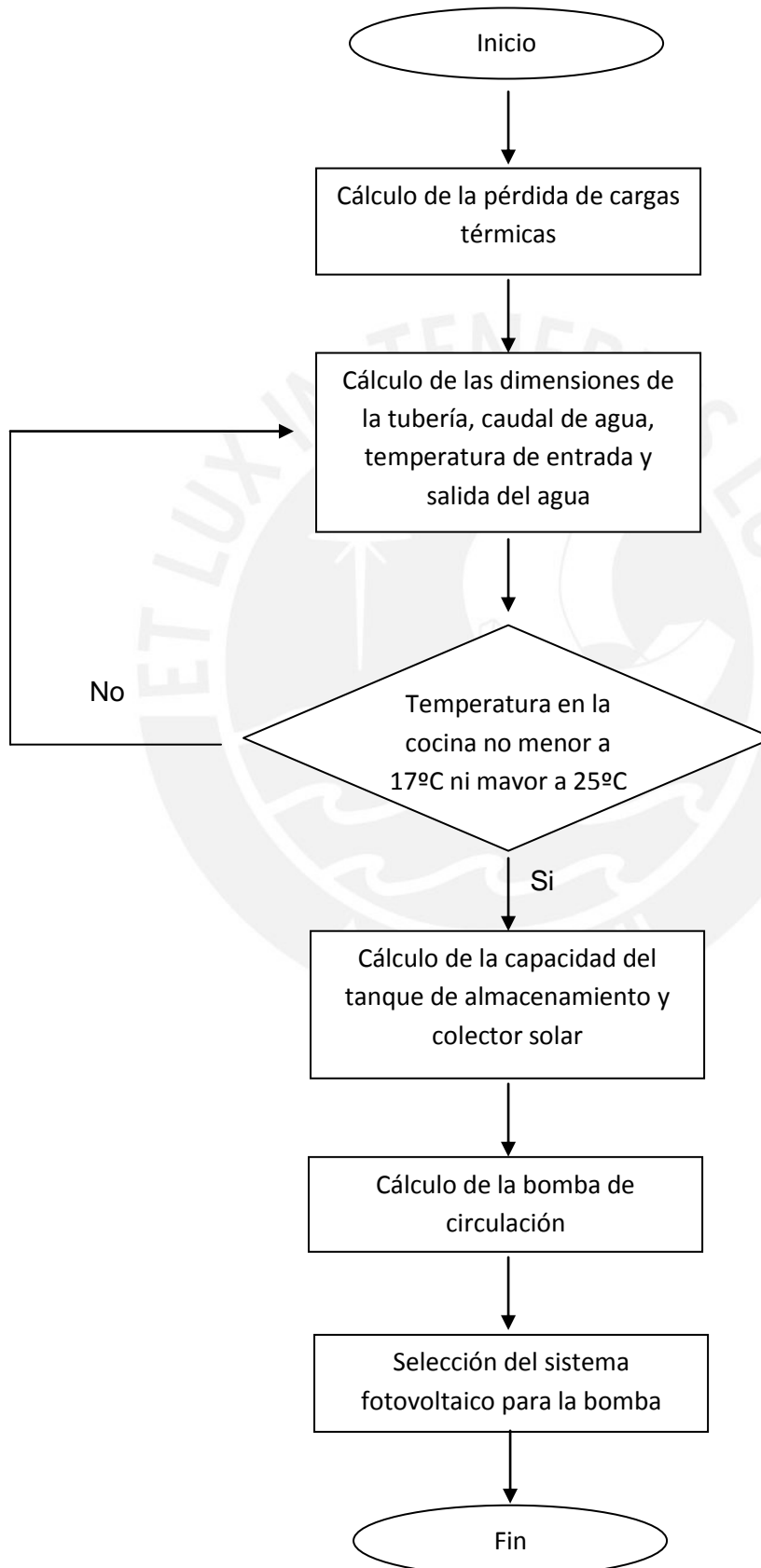


Figura N°26: Comparación entre los Proyectos Preliminares 1,2 y 3

Evaluación:

Con el resultado de la evaluación, analizando tanto el Valor técnico como el Valor económico, se escoge el proyecto preliminar que se encuentre más pegado a la recta cuya pendiente sea  $45^\circ$ . Por ello, se escoge el proyecto "preliminar 3"

### 3.7. Cálculo del sistema



El diagrama de flujo anterior muestra la forma de cómo será calculado todo el sistema.

### 3.7.1. Cálculo de Cargas Térmicas

Para el cálculo de las cargas térmicas se va a seguir la norma DIN EN 12831, en la cual se tiene que calcular básicamente dos parámetros:

- Pérdidas por diferencia de temperaturas
- Pérdidas por renovaciones de aire

El cálculo de este tipo de pérdidas, según la norma DIN EN 12831 (página 28 y 29), se realiza sumando las pérdidas que se realizan

$$\dot{Q}_{total} = \sum \left( \dot{Q}_{temperaturas} \times f_k + \dot{Q}_{ventilacion} \right)_k$$

Además:

$$\dot{Q}_{temperaturas} = \text{Área} \times k \times (T_{int} - T_{ext}) \times f_k$$

$$\dot{Q}_{ventilación} = 0.34 \times \dot{V}_{min} \times (T_{int} - T_{ext})$$

$$k = \lambda / \text{espesor}$$

Para el cálculo de las áreas (Área), se sigue la siguiente regla (DIN EN 12831 página 28), se toma como áreas los extremos generados por las líneas que aparecen en el siguiente esquema:

Para iniciar el cálculo es necesario tener las dimensiones de la casa



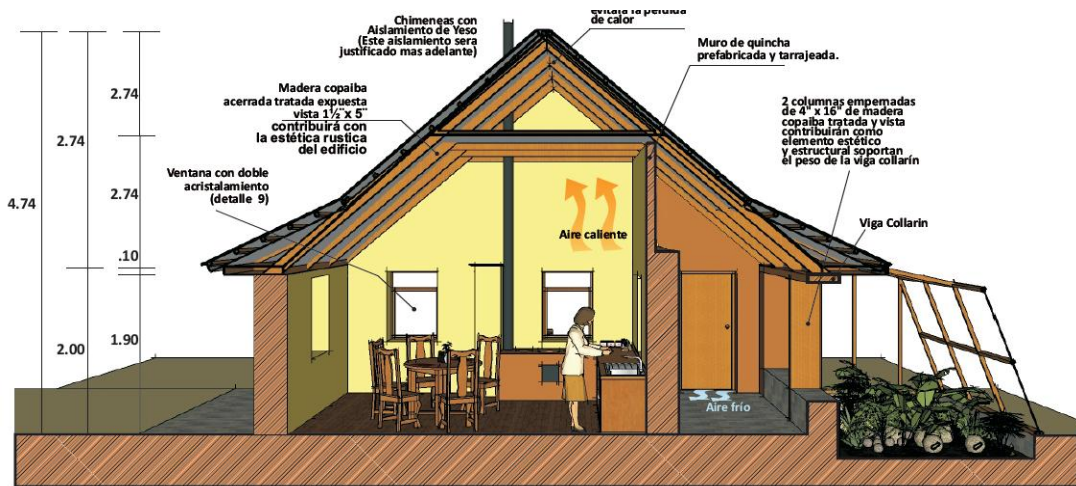


Figura N°27: Dimensiones de la Casa Ecológica

[LIBRO 7]

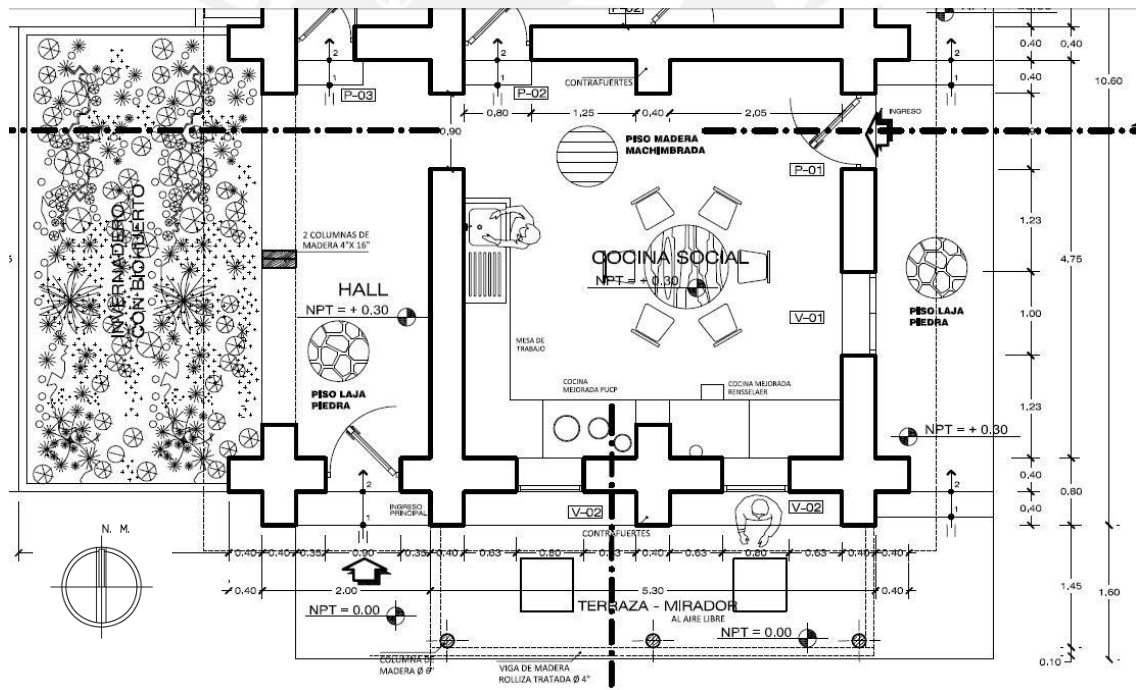


Figura N°28: Vista de planta

[LIBRO 7]

### Pérdidas por diferencia de temperaturas

Para iniciar este cálculo es necesario conocer los materiales de los que está compuesto cada uno de los elementos que intervienen en la transferencia de calor, por ello se elaboró el siguiente cuadro para conocer elemento por elemento:

Tabla 9: Pérdida de calor por cada zona de la casa

Zona	Cantidad	$f_k$	Area (m <sup>2</sup> )	$k$ (W/m <sup>2</sup> °C)	Text (°C)	Tint (°C)	Q (W)	Material
Pared Norte	1	1.12	25	0.50	5	18	182	Adobe mejorado
Pared Sur	1	1.42	25	0.50	5	18	231	Adobe mejorado
Pared Este	1	1.4	15.5	0.50	5	18	141	Adobe mejorado
Pared Oeste	1	0.7	37	0.50	5	18	168	Adobe mejorado
Techo	1	1.26	20	0.28	5	18	92	Tejas
Suelo	1	0.42	20	1.11	5	18	121	Tierra
Puerta	2	1	1.44	2.6	5	18	97	Madera
Ventana	3	1	0.49	5.8	5	18	111	Vidrio
TOTAL							1143 W	

Las temperaturas Text han sido medidas in situ los días 23 y 24 de Julio del año 2009 cada 30 minutos desde las 5pm hasta las 8pm, el valor que ha sido colocado en la tabla es el valor más bajo registrado durante el tiempo que se estuvo realizando la medición. La tabla de valores se muestra a continuación:

**Tabla 10: Temperaturas registradas durante las 5pm y 8pm**

Hora	Día	Temperatura (°C)
05:00pm	24-jul	8
	25-jul	9
05:30pm	24-jul	8
	25-jul	8
06:00pm	24-jul	6
	25-jul	8
06:30pm	24-jul	6
	25-jul	7
07:00pm	24-jul	6
	25-jul	7
07:30pm	24-jul	5
	25-jul	6
08:00pm	24-jul	5
	25-jul	5

Los valores  $f_k$  han sido obtenidos del siguiente cuadro:

**Tabla 11: Factor de corrección de temperatura,  $f_k$ , para el método simplificado**

Pérdidas de calor de las paredes	$f_k$	Comentarios
Directamente al exterior	1.00	Si está aislado
	1.40	Si no está aislado
	1.00	Para ventanas y puertas
En contacto con un ambiente sin calefacción	0.80	Si está aislado
	1.12	Si no está aislado
En contacto con el suelo	0.30	Si está aislado
	0.42	Si no está aislado
En contacto con el techo	0.90	Si está aislado
	1.26	Si no está aislado
Techo intermedio	0.90	Si está aislado
	1.26	Si no está aislado
En contacto con una construcción adyacente	0.50	Si está aislado
	0.70	Si no está aislado

### Pérdidas por renovaciones de aire

$$\dot{Q}_{\text{ventilación}} = 0.34 \times \dot{V}_{\text{min}} \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

El volumen de la sala a calefactar es  $112.5 \text{ m}^3$  y si asumimos que durante las 2 horas y media que trabaja el sistema se realiza una renovación total de aire, entonces se tiene:

$$\dot{V}_{\text{min}} = \text{Volumen} / \text{tiempo} = 112.5 \text{ m}^3 / 2.5 \text{ h} = 45 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$\dot{Q}_{\text{ventilación}} = 0.34 \times 45 \times (18 - 5) = 195 \text{ W}$$

El valor 0.34 es función de la densidad del aire, la norma que se viene empleando ha sido desarrollada a nivel del mar, por ello, nosotros debemos de corregir dicho factor ya que el estudio se realiza a 4000 msnm. La presión a nivel del mar es de 10.33 mca y a 4000msnm es de 6.2 mca.

Entonces:

$$\dot{Q}_{\text{ventilación}} = \frac{6.2}{10.33} \times 0.34 \times 44 \times (18 - 5) = 117 \text{ W}$$

Por lo tanto:  $\dot{Q}_{\text{total}} = 1143 + 117 = 1260 \text{ W}$ , esa es la cantidad total de energía que se debe de suministrar al sistema para que el ambiente se mantenga a  $18^\circ\text{C}$ . Se elige diseñar el sistema a  $18^\circ\text{C}$  porque si bien es cierto la recomendación es que confort térmico se logra alrededor de los  $20^\circ\text{C}$  pero eso es en lugares donde el clima no tiene temperaturas tan cambiantes durante el día (muy caliente de día y muy frío de noche), por ello, cuando se estuvo en Langui se observó a que temperatura uno sentía un ambiente fresco y esta resultó ser entre  $16-18^\circ\text{C}$ . Solo para complementar, los muros trombes calientan instalados calientan alrededor de  $15^\circ\text{C}$  y con eso uno ya puede sentir un ambiente caliente. Por ello, para ser conservador, emplearemos la temperatura de  $18^\circ\text{C}$  para el diseño.

### 3.7.2. Cálculo del suelo radiante

En este capítulo se calculará la longitud de la tubería, la temperatura de entrada y salida del agua.

De la norma DIN EN 1264-2 se tiene la siguiente expresión para poder calcular el flujo máximo de calor por unidad de área, conociendo la temperatura media del suelo ( $T_{\text{suelo}}$ ) y la temperatura de diseño del interior del lugar a calefactar ( $T_{\text{int}}$ )

$$q_{\text{max}} (W / m^2) = 8.92(T_{\text{suelo}} - T_{\text{int}})^{1.1}$$

Para nuestro caso,  $T_{\text{suelo}} = 29^{\circ}\text{C}$  (máximo valor permisible según la norma DIN EN 1264) y  $T_{\text{int}} = 18^{\circ}\text{C}$  (temperatura de diseño para la casa)

Reemplazando se tiene:

$$q_{\text{max}} = 8.92(29 - 18)^{1.1} = 124.7W / m^2$$

Pero, del cálculo de cargas térmicas anteriores

$$q_{\text{diseño}} = \frac{\dot{Q}_{\text{TOTAL}}}{\text{Area}_{\text{suelo-radiante}}} = \frac{1260}{12} = 105W / m^2$$

El  $\text{Area}_{\text{suelo-radiante}}$  no tiene la misma área efectiva que el área total del suelo ya que en la casa se tiene instalada dos cocinas, las cuales reducen el área de la instalación; por ello, solo se tiene como área efectiva para hacer la instalación del suelo  $12\text{m}^2$ .

Con lo que se puede observar que el  $q_{\text{max}}$  es mayor que el  $q_{\text{diseño}}$ , con lo que se puede decir el suelo sí puede proporcionar la energía necesaria para mantener el ambiente a la temperatura que hemos elegido,  $18^{\circ}\text{C}$

### Cálculo de la longitud de tubería

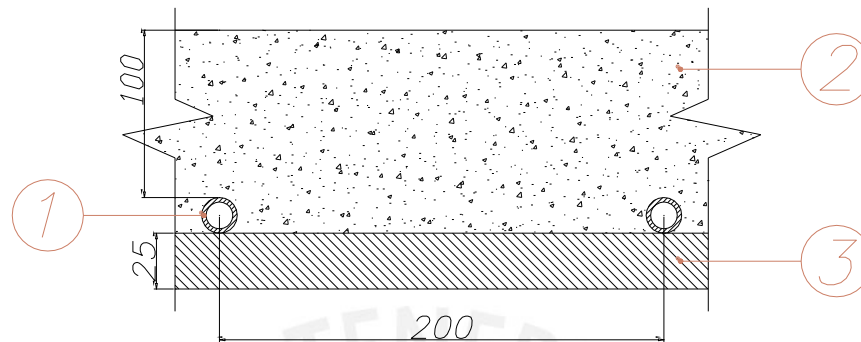


Figura N°29: Esquema de disposición de la tubería en el Suelo Radiante

En este caso se ha considerado que los tubos se encuentran separados una longitud de 20cm (200mm), además son tubos de PEX de ½", el suelo posee las siguientes características:

Tabla 12: Características de la construcción del Suelo Radiante

Características		Medida (mm)
Aislamiento (espesor)		25
Tubería	Diámetro interior	12
	Diámetro exterior	16
Mortero (espesor)		100

Para calcular la longitud de la tubería debe realizarse la siguiente operación

$$L = \frac{Area_{suelo-radiante}}{separación_{tubos}} = \frac{12m^2}{0.2m} = 60m$$

### Cálculo del caudal de agua, temperatura de entrada y salida del agua

Para el cálculo del caudal y de la temperatura de entrada y salida del agua se va a realizar de dos métodos, el primero por transferencia de calor y luego se comprobará con la norma DIN EN 1264-3 (Water based surface embedded heating and cooling systems Part 3: Dimensioning)

- **PRIMER MÉTODO: Por transferencia de calor**

Primero se deben de identificar las resistencias térmicas que hay en todo el sistema

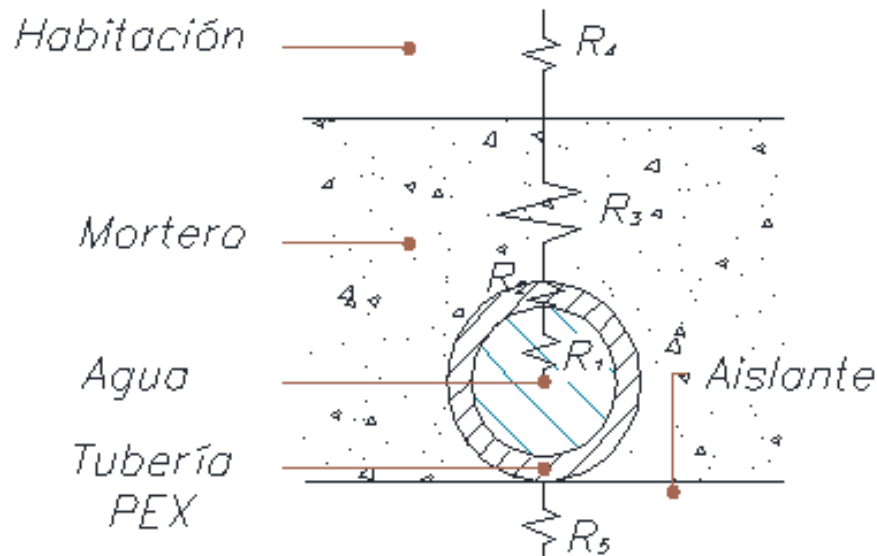


Figura N°30: Esquema de resistencias térmicas del Suelo Radiante

Como el agua se encuentra dentro de la tubería y se encuentra a una temperatura que va desde 35°C y 45°C, se producirá una transferencia de calor hacia el suelo inferior (tierra) y el suelo superior (ambiente interior).

Por ello se tendría lo siguiente:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{tierra} + \dot{Q}_{habitacion}$$

Para hacer el cálculo de la transferencia de calor es necesario conocer todas las resistencias térmicas, por ello será importante conocer el Número de Nusselt del agua para poder hallar su coeficiente convectivo y además se sabe que la temperatura del suelo de la habitación se encuentra a 29°C, la tierra a 6°C y la temperatura de la habitación se encuentra a 18°C

Primero debemos de asumir una velocidad para el flujo de agua

$$v_{agua} = 0.60 \text{ m/s}$$

Por lo tanto el caudal sería

$$flujo_{m\acute{a}sico} = \frac{\pi \times D_{int}^2}{4} \times v \times \rho$$

$$flujo_{m\acute{a}sico} = 0.06 \text{ kg / s}$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \times v \times D_{int}}{\mu}$$

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu \times Cp}{k_{agua}}$$

Número de Nusselt (con la relación de Petukhov, Gnielinski)

$$\zeta = \frac{1}{(1.82 \log(Re - 1.64))^2}$$

$$Nu = \frac{Pr(Re - 1000)(\zeta / 8)}{1 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)\sqrt{\zeta / 8}} \left[ 1 + \left(\frac{D_{int}}{L}\right)^{2/3} \right]$$

Finalmente, el coeficiente convectivo del agua es:

$$\alpha = \frac{Nu \times k}{D_{int}}$$

Si asumimos que la temperatura de ingreso del agua es de 39°C y salida 35°

Se tendría que  $\mu = 6.53 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$  y  $Cp = 4.179 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

Con ello se obtiene los siguientes números adimensionales

**Tabla 13: Valores de los Números Adimensionales**

Números adimensionales	Valor
Re	10107
Pr	4.3
Nu	155



Con ello se calcula el valor del coeficiente convectivo del agua, el cual tiene el siguiente valor  $\alpha=3.5 \text{ kW/}^\circ\text{C}$

Ahora, haciendo el análisis de transferencia de calor en el sistema se tiene

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{tierra} + \dot{Q}_{habitacion}$$

$$\dot{Q}_{habitacion} = \frac{(T_{media-agua} - T_{habitacion})}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\ln(D_{int} / D_{ext})}{2\pi L \lambda_{tuberia}} + \frac{1}{k_{mortero} Area_{suelo}} + \frac{T_{suelo} - T_{habitacion}}{\varepsilon Area_{suelo} \sigma (T_{suelo}^4 - T_{habitacion}^4)}}$$

$$\dot{Q}_{tierra} = (T_{media-agua} - T_{suelo-habitacion}) \times Area_{suelo} \times \frac{\lambda_{aislante}}{espesor_{aislante}}$$

**Tabla 14: Valores de los parámetros físicos del Suelo Radiante**

Dato	Valor	Unidad
$T_{suelo-habitacion}$	29	$^\circ\text{C}$
$\lambda_{tuberia}$	0.43	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
$Area_{suelo}$	12	$\text{m}^2$
$espesor_{mortero}$	10	cm
$k_{mortero}$	13	$\text{W/m}^2\text{C}$
L	60	m
$\lambda_{aislante}$	0.035	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
$espesor_{aislante}$	2.54	Cm
$\sigma$	$5.6697 \times 10^{-8}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
$\varepsilon$	0.97	-

Si asumimos que se va a proporcionar la cantidad de energía requerida para que el sistema funcione correctamente, es decir, se suministrará un flujo de calor igual a  $q_{diseño}=89.3 \text{ W/m}^2$ , como en total se tienen  $12\text{m}^2$ , se tendría **1260 W**.

Por lo tanto, al reemplazar los siguientes valores (que son aproximados a los valores que se deben de tener en el suelo y habitación,  $29$  y  $18^\circ\text{C}$  respectivamente), se tiene:

$$T_{suelo} = 29.5^\circ\text{C}$$

$$T_{habitacion} = 17.5^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, reemplazando en las expresiones superiores se obtiene que:

$$T_{media-agua} = 36.5^{\circ}C$$

Además, el calor que pierde el agua debe ser igual al calor que se ingresa a la habitación (ya que las pérdidas que hay por el panel aislante inferior son pequeñas)

$$\dot{Q}_{total} = caudal \times (T_{ingreso-agua} - T_{salida-agua}) \times Cp \dots (1)$$

Pero, si asumimos que la variación de temperatura dentro del circuito es de forma lineal, se debe de cumplir lo siguiente:

$$\frac{(T_{ingreso-agua} + T_{salida-agua})}{2} = T_{media-agua} \dots (2)$$

Reemplazando (2) en (1) se obtiene

$$T_{ingreso-agua} = 38.6^{\circ}C \text{ (se había asumido } 39^{\circ}C)$$

$$T_{salida-agua} = 34.4^{\circ}C \text{ (se había asumido } 35^{\circ}C)$$

Con lo que se puede concluir que todo lo que hemos asumido está correcto ya que la variación de temperaturas es menor de  $0.5^{\circ}C$ .

**Por lo tanto, la temperatura de ingreso debe ser de  $39^{\circ}C$ , la de salida es  $35^{\circ}C$  con un caudal de  $0.068 \text{ kg/s}$ .**

- **SEGUNDO MÉTODO: Basándonos en la norma DIN EN 1264**

En este caso se asume que la temperatura de agua ( $T_{entrada} = 35^{\circ}C$ ) y la temperatura de salida ( $T_{salida} = 30^{\circ}C$ ). Luego se comprobarán estos valores.

Para el cálculo del caudal, nos basamos en la norma DIN EN 1264-3 (página 8)

$$\dot{m} = \frac{Area_{suelo-radiante} \times q_{diseño}}{\sigma \times Cp} \left( 1 + \frac{R_o}{R_u} + \frac{T_{int} - T_{tierra}}{q_{diseño} \times R_u} \right)$$

$R_o$ : Resistencia térmica que se encuentra sobre las tuberías

$R_u$ : Resistencia térmica que se encuentra debajo de las tuberías

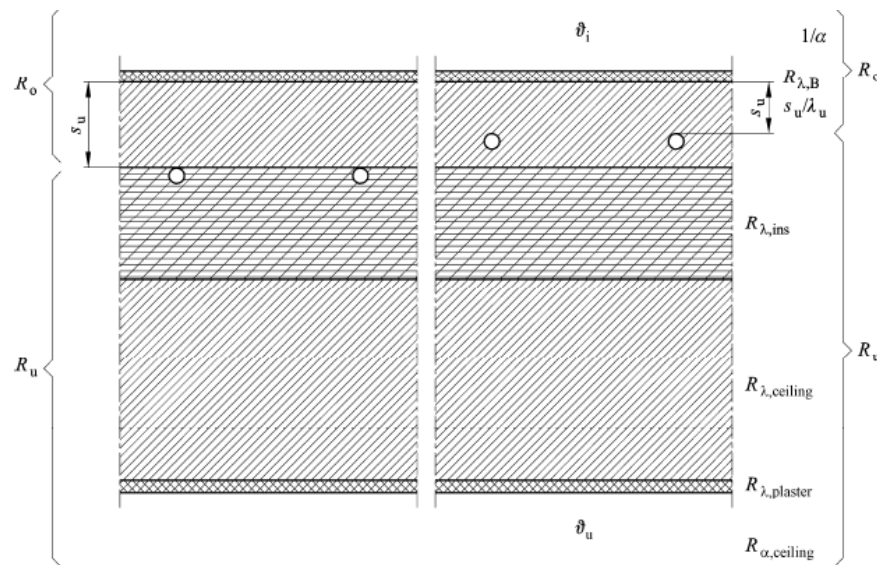


Figura N°31: Esquema de disposición de la tubería en el Suelo Radiante ([LIBRO 8], pág.19)

Para este caso se define

$$\sigma = T_{\text{entrada-agua}} - T_{\text{salida-agua}}$$

$$R_o = \frac{1}{\alpha} + R_{\lambda;B} + \frac{S_u}{\lambda_u}$$

$$R_u = R_{\lambda;ins} + R_{\lambda;ceiling} + R_{\lambda;plaster} + R_{\alpha;ceiling}$$

Según la norma, se tienen los siguientes valores:

$$\frac{1}{\alpha} = 0.0093(m^2 K / W)$$

$$R_{\alpha;ceiling} = 0.17(m^2 K / W)$$

Para nuestro caso no se considerará el “ceiling” ni el “plaster” ya que es una instalación pequeña. El “ceiling” es el material que se coloca entre el suelo y el aislamiento, en nuestro caso no hemos colocado ningún material ahí. El plaster es el plástico que se coloca para evitar que ingrese agua al sistema. . Entonces se tienen los siguientes valores.

$$R_o = \frac{1}{\alpha} + R_{\lambda;B} + \frac{S_u}{\lambda_u} = 0.0093 + 0 + \frac{0.1}{1.3} = 0.086 m^2 K / W$$

$$R_u = R_{\lambda;ins} + R_{\lambda;ceiling} + R_{\lambda;plaster} + R_{\alpha;ceiling} = \frac{0.0254}{0.03} + 0 + 0 + 0 + 0.17 = 1.01$$

Reemplazando en la expresión inicial se tiene:

$$\dot{m} = \frac{Area_{suelo-radiente} \times q_{diseño}}{\sigma \times Ce} \left( 1 + \frac{R_o}{R_u} + \frac{T_{int} - T_{tierra}}{q_{diseño} \times R_u} \right) = \frac{12 \times 105}{5 \times 4190} \left( 1 + \frac{0.086}{1.01} + \frac{18 - 6}{105 \times 1.01} \right)$$

$$\dot{m} = 0.072 kg / s$$

Con lo que se concluye que para un ingreso de temperatura de 35°C y salida de 31° se necesita un flujo másico de 0.072 kg/s para suministrar la energía necesaria.

Calculando el error entre el caudal obtenido por el método de transferencia de calor y la norma:

$$e(\%) = \frac{0.072 - 0.068}{0.072} \times 100\% = 5.5\%$$

Si se compara con el cálculo anterior, los valores de caudal obtenidos son relativamente cercanos (0.072 y 0.068 kg/s) con un error de 5.5%, pero se trabajará con el valor obtenido en la norma porque nos da un valor un poco mayor que el obtenido por intermedio del otro procedimiento, lo tomaremos como un factor de seguridad.

### Variación de la Humedad Relativa del sistema

Al suministrarle calor al aire que se encuentra dentro de la Casa Ecológica, haremos variar sus condiciones, es decir, no solo aumentaremos su temperatura sino también su humedad relativa (HR). Si bien es cierto, en la presente tesis, no se diseñará y/o instalará algún sistema para poder controlar la HR, pero es necesario conocer si es que este sistema es necesario o no.

**Solución Nº 1:**

Asumiremos un valor bajo de H.R. (10%) y veremos como varía este valor con el calor que se le suministra al sistema, si se satura, entonces podríamos decir que definitivamente se va a necesitar un deshumidificador ya que estamos considerando una valor de H.R. muy bajo.

Para poder realizar los cálculos debemos de tener en cuenta lo siguiente:

- El volumen de aire a calentar es igual a 112.5m<sup>3</sup>, como hemos considerado que el volumen de aire se renueva por completo, entonces, se tendría el doble de aire, es decir 225m<sup>3</sup>
- Consideramos que la H.R. en Langui es de 10%

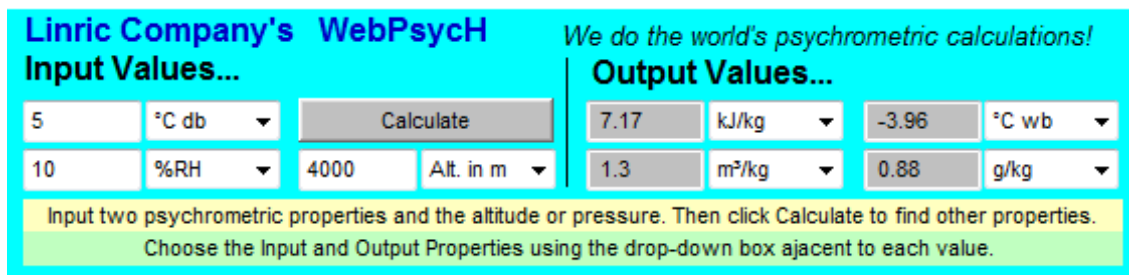
Entonces, se tendría lo siguiente:

$$\frac{m_{\text{aire}} \times (h_{\text{final}} - h_{\text{inicial}})}{\text{tiempo}} = \dot{Q}_{\text{habitación}}$$

$$\frac{\text{Volumen} \times \rho_{\text{aire}} \times (h_{\text{final}} - h_{\text{inicial}})}{\text{tiempo}} = \dot{Q}_{\text{habitación}}$$

Como se sabe, Langui se encuentra a 4000 msnm y la temperatura del aire de bulbo seco es de 5°C y la H.R. es de 10%, con estos datos procederemos a calcular las propiedades del aire, esto lo logramos gracias al software que está alojado en la página web de la empresa LINRIC

**Tabla 15: Propiedades del aire al inicio del proceso**



**Linric Company's WebPsych** We do the world's psychrometric calculations!

**Input Values...**

5	°C db	Calculate
10	%RH	4000 Alt. in m

**Output Values...**

7.17	kJ/kg	-3.96	°C wb
1.3	m <sup>3</sup> /kg	0.88	g/kg

Input two psychrometric properties and the altitude or pressure. Then click Calculate to find other properties.  
Choose the Input and Output Properties using the drop-down box adjacent to each value.

Como se puede observar, hemos ingresado los datos anteriormente mencionados, en el primer recuadro ingresamos el valor de la temperatura del bulbo seco (5°C), en el

recuadro siguiente la H.R. (10%) y por último la altura (4000msnm); con ello obtenemos la entalpía del aire (7.17 kJ/kg), el volumen específico (1.3 m<sup>3</sup>/kg), la temperatura del bulbo húmedo (-3.96°C). A partir de esto podemos asumir que el peso específico va a ser casi constante así que tomaremos este valor para realizar los cálculos correspondientes, cabe señalar que el peso específico es la inversa de la densidad.

Reemplazando se obtiene:

$$\frac{\text{Volumen} \times \rho_{\text{aire}} \times (h_{\text{final}} - h_{\text{inicial}})}{\text{tiempo}} = \dot{Q}_{\text{habitación}}$$

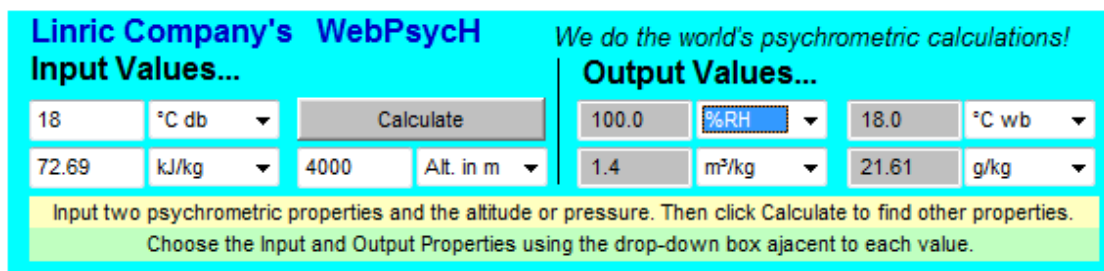
$$\frac{225 \times (1/1.3) \times (h_{\text{final}} - 7.17) \times 1000}{2.5 \times 3600} = 1260$$

$$h_{\text{final}} = 72.69 \text{ kJ / kg}$$

Ahora, usando reemplazamos los datos que se tienen del aire:

- Temperatura del bulbo seco 18°C
- Entalpía final del aire 72.69 kJ/kg
- Altitud 4000 msnm

Tabla 16: Propiedades del aire al final del proceso



Con ello se puede observar que la HR es del 100%, pero nosotros sabemos que el límite máximo es de 70%, por ello, se debe de emplear un deshumidificador para disminuir la humedad del aire.

**Solución Nº 2:**

Otra forma de controlar la humedad relativa es ventilando el ambiente, es decir, haciendo que ingrese “aire fresco” al sistema, entonces veamos cuanto aire fresco necesitaríamos para poder mantener una H.R. de 60% en el ambiente, tendríamos lo siguiente:

$$\frac{\text{Volumen} \times \rho_{\text{aire}} \times (h_{\text{final}} - h_{\text{inicial}})}{\text{tiempo}} = \dot{Q}_{\text{habitación}}$$

Para este caso variaríamos el volumen del aire, se va a calcular el volumen necesario de aire que requiere el sistema para mantener la H.R. deseada, las consideraciones iniciales son:

- La H.R. inicial del sistema es 70% (para considerar en el caso más crítico)
- Temperatura de bulbo seco es de 5°C
- La Casa Ecológica se encuentra a 4000 msnm
- 

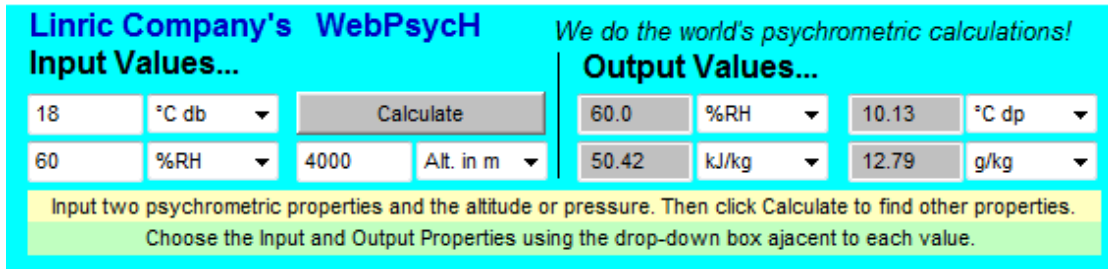
**Tabla 17: Propiedades del aire al inicio del proceso**

Linric Company's WebPsych				We do the world's psychrometric calculations!			
Input Values...				Output Values...			
5	°C db	Calculate		70.0	%RH	-0.01	°C dp
70	%RH	4000	Alt. in m	20.61	kJ/kg	6.24	g/kg
Input two psychrometric properties and the altitude or pressure. Then click Calculate to find other properties.							
Choose the Input and Output Properties using the drop-down box adjacent to each value.							

Las condiciones finales son:

- La H.R. final del sistema es 60% (para estar en el caso más crítico)
- Temperatura de bulbo seco es de 18°C
- La Casa Ecológica se encuentra a 4000 msnm

Tabla 18: Propiedades del aire al final del proceso



Reemplazamos los valores obtenidos en la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Volumen} \times \rho_{\text{aire}} \times (h_{\text{final}} - h_{\text{inicial}})}{\text{tiempo}} = \dot{Q}_{\text{habitación}}$$

$$\frac{\text{Volumen} \times (1/1.3) \times (50.42 - 20.61) \times 1000}{2.5 \times 3600} = 1260$$

$$\text{Volumen} = 494\text{m}^3$$

Se puede observar que se necesita un volumen de  $494\text{m}^3$ , sabiendo que el volumen del recinto es de  $112.5\text{m}^3$ , por ello, se necesita renovar el aire 5 veces, ya se ha considerado una renovación de aire, esto significa que el calor perdido por renovación de aire va a aumentar, ya que inicialmente se tenía:

$$\dot{Q}_{\text{ventilación}} = \frac{6.2}{10.33} \times 0.34 \times 44 \times (18 - 5) = 117\text{W}$$

Entonces, las pérdidas de calor por ventilación serían 5 veces el valor anteriormente calculado (117 W) lo cual equivale a 885 W. Este calor extra afectaría a las consideraciones que se habían hecho del sistema inicial, aumentando las dimensiones anteriormente calculadas, procederemos a calcular

El  $q_{\text{diseño}}$  va a cambiar, el nuevo valor es:

$$q_{\text{diseño}} = \frac{\dot{Q}_{\text{TOTAL}}}{\text{Area}_{\text{suelo-radiante}}} = \frac{1143 + 885}{12} = 169\text{W} / \text{m}^2$$



Se observa que el  $q_{\text{diseño}}$  ( $169 \text{ W/m}^2$ ) es mayor al  $q_{\text{max}}$  ( $124.7 \text{ W/m}^2$ ), con lo que podemos inferir que el sistema no podrá entregar el calor necesario que el sistema requiere, por ello, necesariamente se necesita un deshumidificador.

Como se mencionó anteriormente, la tesis no contempla controlar la H.R. pero nos da una noción que se necesita elaborar un sistema que pueda controlarlo o en todo caso, instalar un deshumidificador para bajar la H.R. a valores recomendados.

### Selección de la bomba de circulación

Para calcular la bomba es necesario conocer tres parámetros:

- Caudal
- $H_{\text{man}}$
- NPSH

Para calcular el caudal, sabemos que el flujo másico que circula por la tubería es de  $0.072 \text{ kg/s}$ , el agua se encuentra a una temperatura media de  $36 \text{ }^\circ\text{C}$  eso quiere decir que su densidad es de  $992.24 \text{ kg/m}^3$ , dándonos como resultado un **caudal de  $0.0725 \text{ lt/s}$**

Para el cálculo del  $H_{\text{man}}$  y NPSH es necesario conocer la distribución de la tubería y conocer dónde se va a ubicar la bomba. Por ello, se seguirá el siguiente esquema (más detalles se pueden ver en el PLANO DE DISPOSICIÓN que está anexado a la presente tesis):

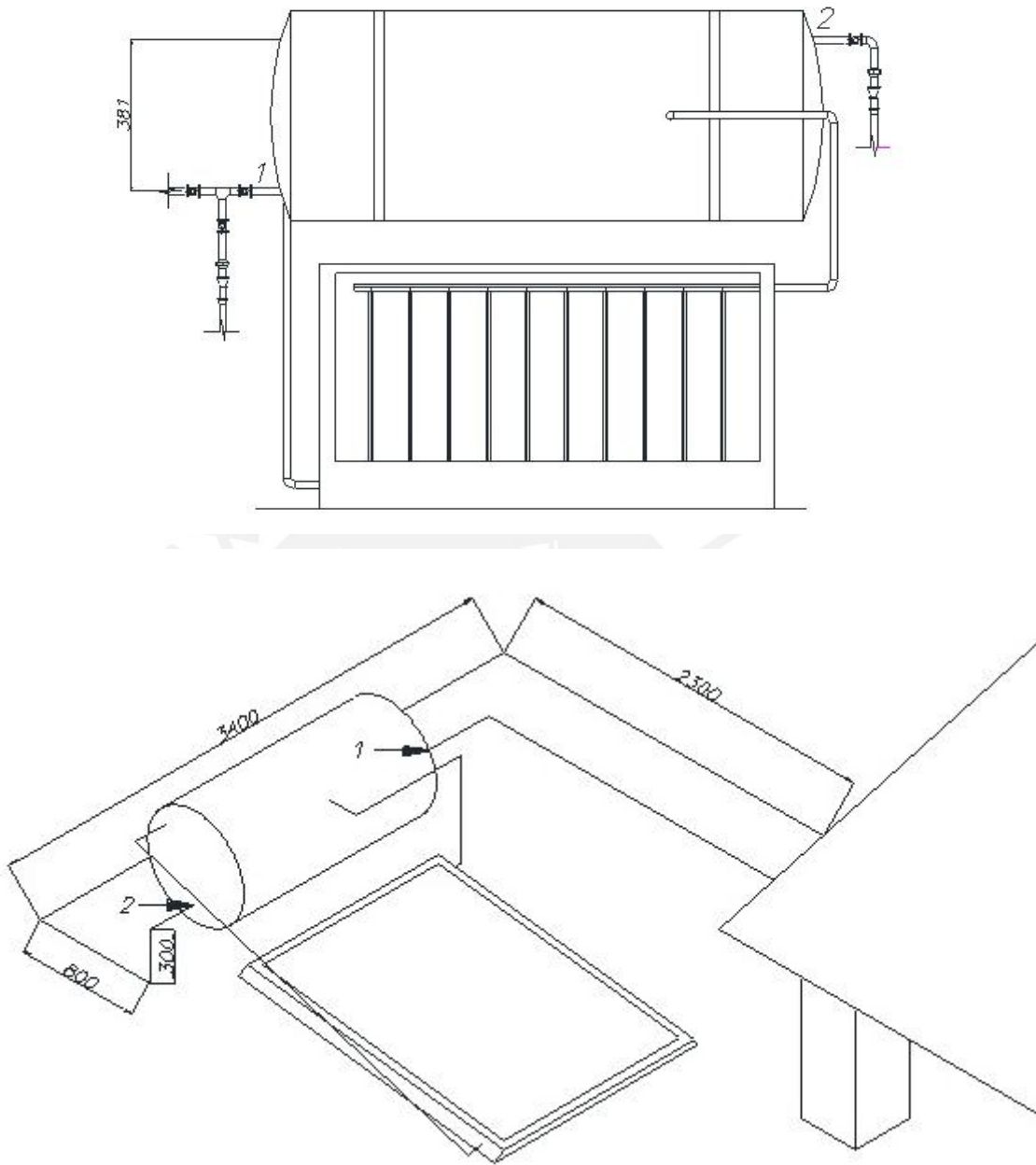


Figura N°32: Esquema de disposición del Suelo Radiante

Entonces, se tiene (entre la entrada 1 y la salida 2)

$$\frac{P_1}{g\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{g\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{pérdidas}$$

$$h_{man} = \frac{P_2}{g\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{pérdidas} - \left( \frac{P_1}{g\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right)$$

Como todo está dentro del mismo circuito,  $v_1=v_2$ , además  $z_1=0$  y  $z_2=0.381$  m

Además:

$$P_1 + h = P_2$$

$$P_2 - P_1 = 0.381mca$$

Por lo tanto se reduce a la siguiente expresión:

$$h_{man} = \text{pérdidas} + z_2 + 0.381$$

Para el cálculo de las pérdidas, nos basamos en la información brindada por un proveedor peruano (ITALCASE S.A), el cual muestra las pérdidas de presión en la tubería (ver Figura N°34 y Tabla 13)

Además se sabe que:

$$\text{caída}_{\text{presion-total}} = \text{caída}_{\text{presion-lineal}} \times L + \text{caída}_{\text{presion-accesorio}} \times \text{cantidad}_{\text{accesorio}}$$

$$\text{caída}_{\text{presion-total}} = \text{caída}_{\text{presion-lineal}} \times (L + \text{longitud}_{\text{equivalente-total}})$$

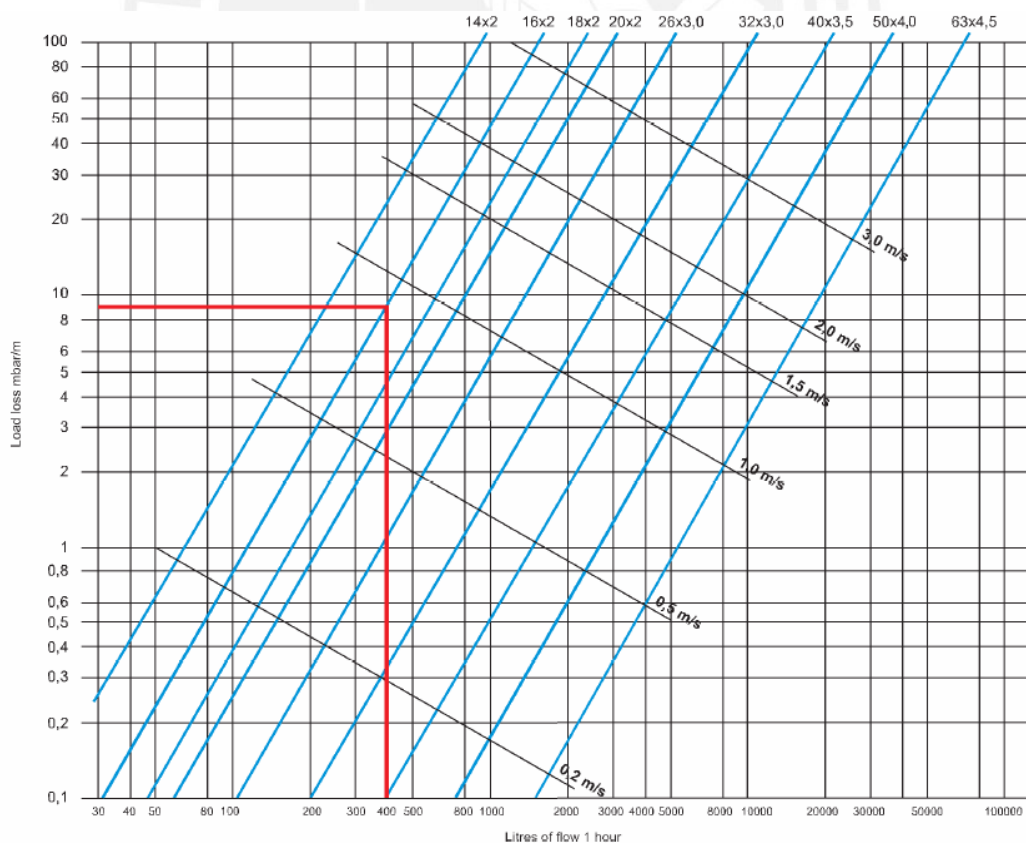


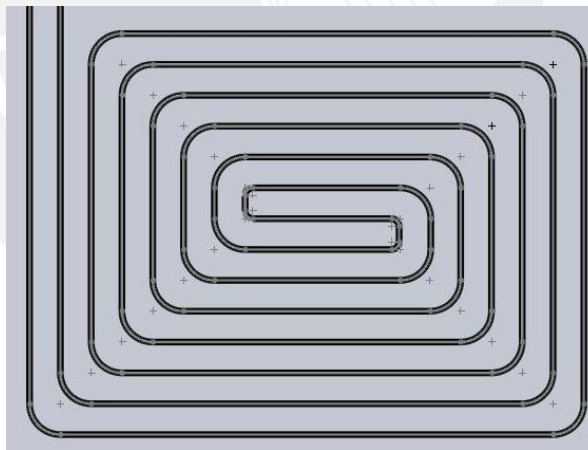
Figura N°33: Diagrama de pérdidas en la tubería de PEX

**Tabla 19: Pérdidas por los accesorios en la tubería de PEX  
(Longitud equivalente en metros de tubería)**

*Corresponding length (in metres of pipe):*

Fitting	Da 14	Da 16	Da 18	Da 20	Da 26	Da 32
Tee	1,14	1,37	1,60	1,83	2,29	-
Bend 90°	0,95	1,15	1,35	1,55	1,95	-
Coupling	0,75	0,90	1,05	1,20	1,50	-

Como bien la forma de la instalación de las tuberías será en espiral y el tubo de ½" de diámetro interno (para el proveedor es catalogada como **tubería de 16x2**). Como ya se ha mencionado y calculado anteriormente la longitud total será de 60m y como tendrá la forma de espiral en total habrán 28 cambios de dirección de 90° por ello, se considerarán como si fueran 28 codos de 90° (ver Figura N°35). Además hay que añadir los codos de 90° que se han empleado para toda la instalación (07 en total)



*Figura N°34: Vista de planta del Suelo Radiante*

Ahora, para calcular la pérdida de carga, se emplean la Figura N°33 y la Tabla 13 de donde se deduce:

$$longitud_{equivalente-total} = longitud_{accesorio} \times cantidad_{accesorio}$$

$$longitud_{equivalente-total} = 1.15 \times (28 + 7) = 40.2m$$

Para el cálculo de la presión en la tubería, se debe de recordar que la longitud de tubería es de 60m, además que el flujo de agua es de **0.068 l/s (245 l/hr)**. Buscando el valor en la tabla, se obtiene una pérdida lineal de **6 mbar/m**

$$caida_{presion-total} = caida_{presion-lineal} \times (L + longitud_{equivalente-total})$$

$$caida_{presion-total} = 0.006 \times (70 + 40.2) = 0.66bar = H_{man}$$

Ahora, para el cálculo del NPSH, se conoce lo siguiente:

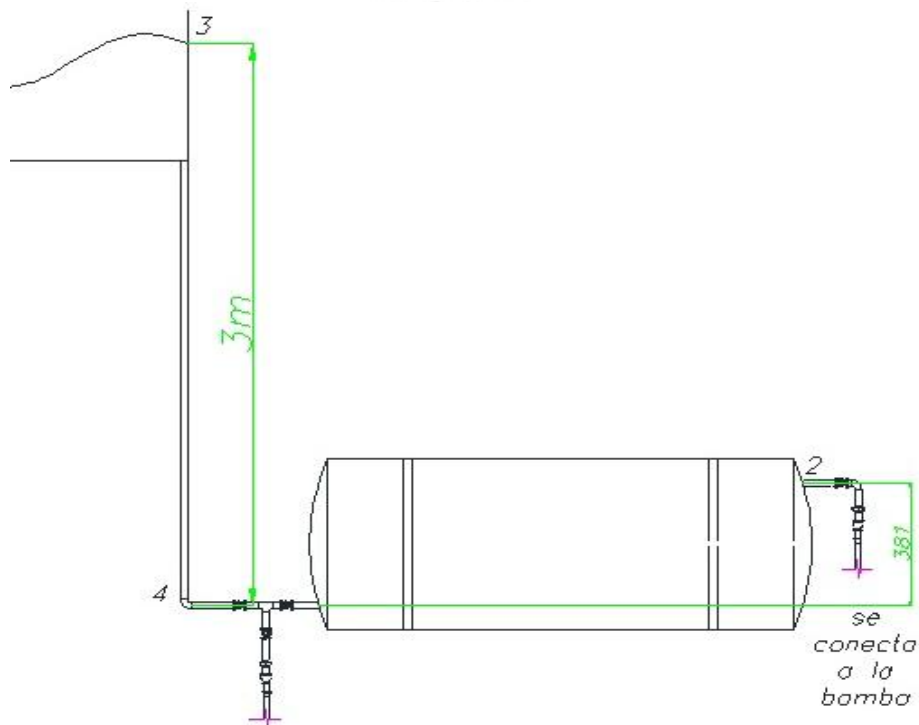


Figura N°35: Disposición de las tuberías antes de ingresar a la bomba

$$NPSH = P_3 - P_v - P_{perdidas-succión} - \rho gh_3$$

$$NPSH = 64746 - 6132 - 66000 - 992 \times 9.81 \times 3$$

$$NPSH = -36580Pa = -3.7mca$$

Ese valor del NPSH (-3.7mca) indica que no se va a sufrir problemas por cavitación ya que siempre va a haber mayor presión que la requerida para que no cavite. Además se puede observar que la bomba siempre va a estar “cebada” porque se encuentra por debajo del nivel del líquido.

Con los datos ya calculados se puede proceder a calcular la bomba necesaria para hacer circular el agua

**Tabla 20: Parámetros característicos del sistema de tuberías del Suelo Radiante**

Datos	Valores
Caudal	0.0725 l/s ó 261 L/h
Hman	6.6 mca
NPSH	-3.7 mca

Para poder seleccionar la bomba, nos basaremos en el mapamundi de bombas que suministra la marca **ROWA**, cuyo proveedor en Lima es la empresa **TRANSSEN**:

**Tabla 21: Características de las bombas ROWA**

Modelo	Vel.	Presión mca (m.c.a.)	Caudal mca (L/h)	Corriente (A)		Potencia HP	Conexión	Peso Kg
				220 V	380 V			
4/1 S	1	2,2	1100	0,25	-	0,08	3/4"	3,20
	2	3,5	1800	0,35	-			
	3	4,5	3200	0,50	-			
5/1 S	1	3,7	2200	0,35	-	0,10	3/4"	3,70
	2	4,2	3400	0,45	-			
	3	5,3	4700	0,60	-			
7/1 S	1	3,5	2600	0,45	-	0,13	1"	5,70
	2	5,3	4300	0,65	-			
	3	7,1	6200	0,80	-			
12/1 S	1	3,0	2300	0,70	-	0,17	1"	6,50
	2	6,2	3600	1,05	-			
	3	10	6100	1,50	-			
18/2 S	1	19,00	4000	2,50	-	0,50	1"	10,50
25/2 S	1	25,00	6500	5,50	-	0,80	1"	17,50
30/2 S	1	29,00	6500	6,00	-	1,00	1"	24,00
10/2 S	1	10,00	14000	3,00	2,60	0,50	1½"	18,00
15/1 S	1	14,50	23000	5,00	3,45	1,25	1½"	22,50
20/1 S	1	19,50	30000	7,50	6,00	2,00	1½"	24,50
27/2 S	1	26,00	20000	8,00	6,20	2,00	1½"	25,00
25/1 S	1	27,00	35000	-	7,80	3,00	1½"	30,00

Del la tabla anterior, se escoge la bomba ROWA 7/1S, la cual garantiza cumplir con los requerimientos de caudal, NPSH y Hman si funciona en la tercera velocidad (en la más alta).

### 3.7.3. Selección del colector solar

En zonas donde la temperatura ambiente alcanza valores por debajo de 0°C, el sistema debe de poseer un sistema de protección de anticogelamiento, por ello se ha desarrollado un sistema el cual posee dos circuitos. El calentador de agua está compuesto de dos circuitos. En el Circuito Primario, está conformado por el circuito cerrado que pasa por el colector y el intercambiador de calor y es aquí donde se depositará el anticongelante. Este líquido protege los colectores contra calcificaciones y congelamiento del sistema por las bajas temperatura. Este circuito funciona por termosifón; el sol incide en el colector y calienta el anticongelante que se encuentra en el Circuito Primario, asciende al intercambiador de forma natural debido a la diferencia de densidades (más caliente menos denso y viceversa), transmite el calor al agua que se encuentra en el Circuito Secundario y vuelve a bajar al colector para volver a calentarse y repetir el ciclo nuevamente. El Circuito Secundario, está conformado por el tanque acumulador en el que ingresa el agua fría de la red y sale agua caliente para el consumo (Ver Figura N°36). El producto ha sido construido siguiendo la normal de termas solares NTP 399.400:2001. INDECOPI.

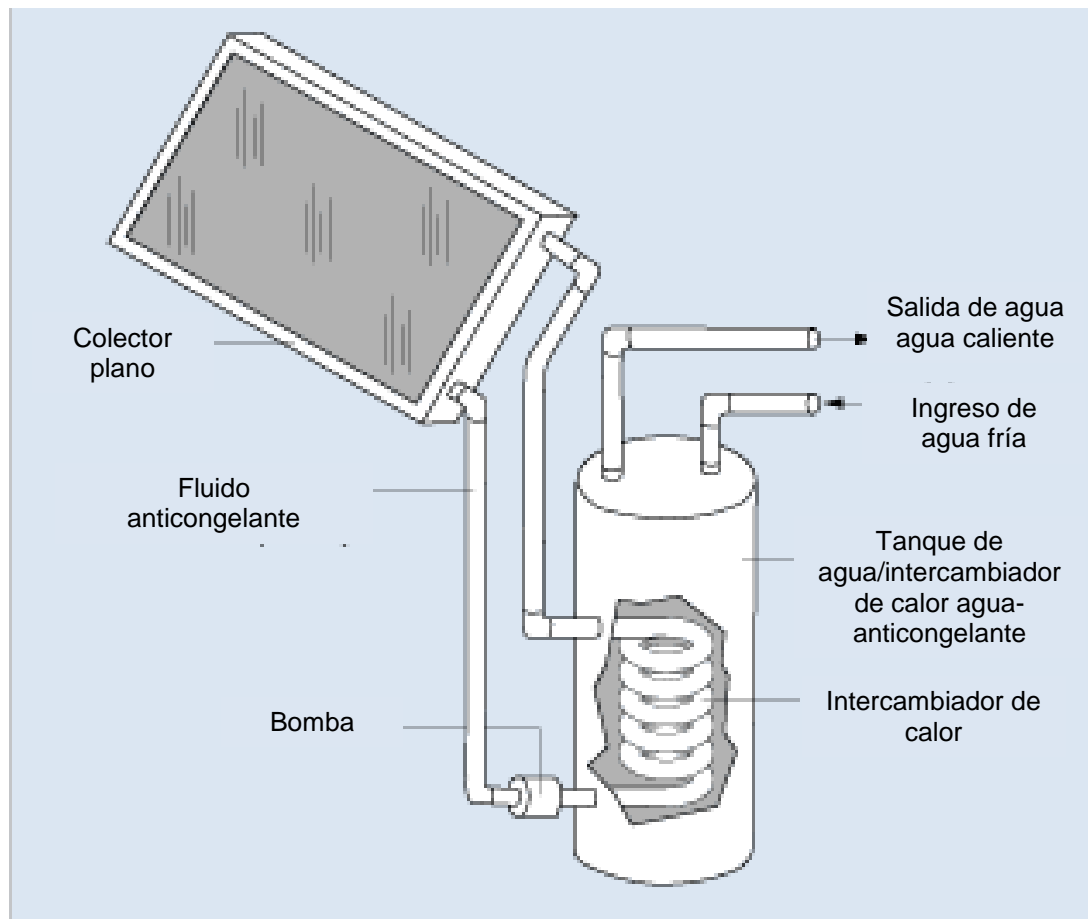


Figura N°36: Interior de la Terna Solar para regiones frías [10]

Para esta selección, es necesario tener presente que según las experiencias realizadas en Langui o en lugares similares en Cuzco (a la misma altura y con el mismo clima) se ha comprobado que para un colector de 2m<sup>2</sup> y 180l se ha llegado a calentar el agua hasta una temperatura de 60°C (medición realizada por el GRUPO-PUCP en la zona), por ello, se comprobará si este aporte energético es necesario para mantener en funcionamiento nuestro sistema:

$$\dot{Q} = \frac{m_{\text{agua-reservorio}} \times C_p \times (T_{\text{máxima}} - T_{\text{mínima}})}{t}$$

Al analizar la fórmula anterior, se puede concluir lo siguiente, que si se tiene una determinada masa de agua a una temperatura elevada ( $T_{\text{máxima}}$ ) y al final del proceso se obtiene una temperatura baja ( $T_{\text{mínima}}$ ), se puede calcular entregado por el sistema,



pero si dividimos ese valor entre el tiempo de funcionamiento tendremos el flujo de calor promedio entregado.

La temperatura máxima ( $T_{\text{máxima}}$ ) viene dada por la máxima temperatura que se alcanza en el tanque unido al colector solar, mientras que la mínima ( $T_{\text{mínima}}$ ) viene a ser la temperatura que se necesita para hacer funcionar al sistema.

$$\dot{Q} = \frac{180 \times 4190 \times (60 - 43)}{2.5 \times 3600} = 1424W$$

Se puede observar que el valor de 1424 W es superior al valor de  $Q_{\text{total}}$  (1133 W) que necesita el sistema para funcionar, por ello, la capacidad estaría bien para la aplicación que se requiere.

#### 3.7.4. Selección del sistema fotovoltaico

Para esta selección, se utilizará una hoja de cálculo brindada por la institución ITDG en donde se recibió un curso sobre recursos solares. En el siguiente cuadro debemos de colocar la potencia que consume el equipo, en este caso la bomba, y luego el tiempo que se requiere que funcione por cada día.

Potencia (W)	Horas / día	días / semana	horas/día promedio	Wh / día promedio	W maxi
97	2.5	7	2.5	243	97

#### Variables de funcionamiento

Se debe de colocar la temperatura promedio del lugar (la cual afecta al rendimiento del panel solar), la ubicación y el PSH (el tiempo de sol efectivo que hay en todo el día)

Lugar	Cuzco
Temperatura de funcionamiento	7
PSH (minimo)	5

### Rendimientos

Se deben de colocar los rendimientos de cada uno de los elementos que intervienen en el sistema fotovoltaico, en este caso haremos uso de un inversor el cual es necesario para hacer funcionar la bomba ya que de la batería se obtiene corriente DC y la bomba requiere AC.

Al momento de colocar los rendimientos, se colocaron los valores más bajos recomendados:

Inversor	85%
Baterias	85%
Cableado	97%
Regulador	100%
Panel Fotovoltaico (temperatura)	102%
Rendimiento del sistema sin FV (DC)	82%
Rendimiento del sistema incluyendo FV	84%

### Sistemas/Arreglos

Se debe seleccionar el tipo de arreglo para los paneles, es decir, el voltaje al cual queremos que salga la corriente eléctrica (12V para nuestro caso) y los días de autonomía (3 días recomendado) que son los días que la vivienda debe de tener energía si es que por alguna razón deja de haber incidencia de rayos solares en los paneles.

Con respecto a la batería, debemos de colocar su capacidad en Ah (Amperios hora), el voltaje que debe de tener (ya fue indicado de 12V) y la máxima capacidad de descarga (50%), es decir que si la batería se descarga hasta el 50% de su capacidad, el controlador no permite que se siga distribuyendo energía al interior de la vivienda.

Con respecto a los paneles, debemos de colocar un valor de potencia del panel solar para luego poder hacer el cálculo de cuántos paneles de esa capacidad serán necesarios.

Días de autonomía	3 días
-------------------	--------

Sistema / Arreglo	Voltaje del arreglo	12 V.
-------------------	---------------------	-------

BATERIA	Descarga maxima bateria	50%
	Voltaje de la bateria	12 V.
	Capacidad	200 Ah.

PANELES	Voltaje de los paneles	12 V.
	Wp de los paneles	80 Wp

Coefficiente seguridad	1.25
------------------------	------

Con los que se obtiene:

**Cálculo de la cantidad de paneles solares:**

Para obtener el número de paneles que se necesitan para el sistema planteado, se hace el siguiente procedimiento:

$$\frac{Potencia_{diaria}}{PSH \times Eficiencia_{total}} \leq Potencia_{panel-solar}$$

Reemplazando los valores se obtiene:

$$\frac{285}{5 \times 0.84} \leq 80Wp \rightarrow 68Wp \leq 80Wp$$

Con el resultado anterior podemos observar que el requerimiento diario puede ser suministrado por un panel de 80Wp (Watts pico)

PANELES	80 Wp	
Tamaño Arreglo (diseño)	cantidad paneles	cantidad paneles
Wp	Serie	total
80	1	1

**Cálculo de la cantidad de baterías:**

Para obtener el número de baterías que se necesitan para el sistema planteado, se hace el siguiente procedimiento:

$$\frac{Potencia_{diaria} \times dias_{autonomía}}{Eficiencia_{total} \times \%desc\ arg\ a \times Voltaje} \leq Corriente_{batería}$$

Reemplazando:

$$\frac{285 \times 3}{0.84 \times 0.5 \times 12} \leq 100 \rightarrow 173Ah \leq 200Ah$$

Se observa que con una batería de 200 Ah (Amperios hora) es necesaria para mantener el sistema funcionado durante el tiempo que se requiere.

	BATERIAS	200 Ah
<b>Capacidad baterías (diseño)</b>	cantidad baterías	<b>cantidad baterías</b>
<b>Ah</b>	<b>serie</b>	<b>total</b>
<b>200</b>	1	1

Para el desarrollo de los cálculos se ha considerado que el número de “días de autonomía” es igual a 3, es decir, el sistema funcionaría si es que por 3 días no recibe rayos solares para poder generar energía eléctrica y cargar la batería; se tomó este valor porque es una recomendación de las personas de CEDECAP. Ahora, podemos variar este número para ver cómo varía la capacidad de la batería.

Si consideramos 2 días de autonomía.

	BATERIAS	115 Ah
<b>Capacidad baterías (diseño)</b>	cantidad baterías	<b>cantidad baterías</b>
<b>Ah</b>	<b>serie</b>	<b>total</b>
<b>115</b>	1	1

Se observa que con una batería de por lo menos 115 Ah (Amperios hora) es necesaria para mantener el sistema funcionado durante el tiempo que se requiere.

Si consideramos 1 día de autonomía

	BATERIAS	58 Ah
Capacidad baterías (diseño)	cantidad baterías	cantidad baterías
Ah	serie	total
58	1	1

Se observa que con una batería de por lo menos 58 Ah (Amperios hora) es necesaria para mantener el sistema funcionado durante el tiempo que se requiere.

### Cálculo del regulador:

Para el cálculo del regulador se realiza la siguiente operación:

$$\frac{Potencia_{m\acute{a}xima-diaria}}{Voltaje_{sistema} \times Coeficiente_{seguridad}} \leq Corriente_{regulador}$$

Reemplazando los valores se obtiene:

$$\frac{97}{12 \times 1.5} = 6.5A \leq Corriente_{regulador}$$

Con lo que se deduce que el regulador debe de soportar al menos una corriente de 6.5 A

Regulador	
corriente maxima FV	corriente maxima Carga
Amp	Amp
5.5	6.5

### 3.7.5. Cálculo del aislamiento de la tubería

Como se puede observar en la Figura N° hay una parte de la tubería que se encuentra fuera de la casa, dicha tubería contiene agua que por la noche se puede encontrar a temperaturas por debajo de 0°C, por ello es importante aislarlas para garantizar que no se rompa la tubería si es que se congela el agua.

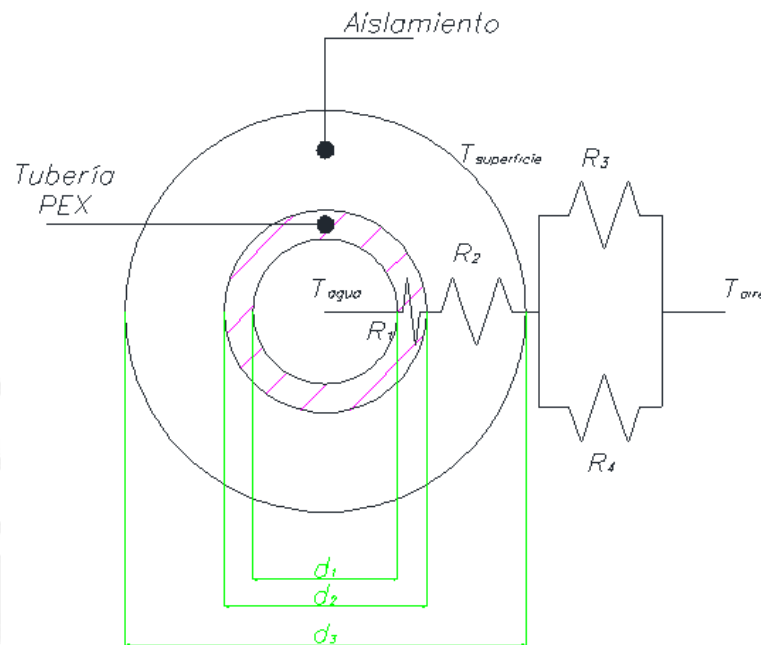


Figura N°37: Esquema de las resistencias térmicas entre la tubería aislada y el medio exterior

Entonces, la temperatura al interior de la tubería podemos asumir que es la misma temperatura que la del agua ( $T_{\text{agua}}$ ), y esta a su vez es la temperatura que tiene el agua luego de haber circulado por todo el Suelo Radiante (40°C), ya para la temperatura del aire ( $T_{\text{aire}}$ ) vamos a considerar la temperatura más baja que se tiene durante todo el año para considerar el caso más desfavorable y poder garantizar su funcionamiento, en este caso, observando la Tabla N°2 esta temperatura sería igual a -17°C

Analizamos la transferencia de calor en el sistema:

$R_1$  y  $R_2$ : Transferencia de calor por conducción

$R_2$ : Transferencia de calor por convección

$R_3$ : Transferencia de calor por radiación

Para  $R_1$

$$R_1 = \frac{\ln(d_2 / d_1)}{2\pi \times l \times k_{tuberia}}$$

Para  $R_2$

$$R_2 = \frac{\ln(d_3 / d_2)}{2\pi \times l \times k_{aislamiento}}$$

Para  $R_3$ :

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{aire}}$$

Para  $R_4$ :

$$R_3 = \frac{T_{superficie} - T_{aire}}{\varepsilon \times 2\pi \times l \times d_{ext} \times \sigma (T_{superficie}^4 - T_{aire}^4)}$$

Analizando la transferencia de calor total:

$$\overset{o}{Q}_{pérdidas-aire} = \frac{T_{agua} - T_{aire}}{R_1 + R_2 + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4}}$$

Hallando los valores de cada una de las resistencias térmicas, sabiendo que la tubería que se encuentra fuera de la casa mide aproximadamente 10m, además que se va a emplear aislamiento de marca ARMAFLEX de media pulgada de espesor:

**Tabla 22: Valores para el cálculo de resistencias térmicas**

Datos	Valor	Unidades
$d_1$	12	mm
$d_2$	16	mm
$l$	10	m
$k_{tuberia}$	0.35	W/m°C
$k_{aislamiento}$	0.032	W/m°C



$$R_1 = \frac{\ln(d_2 / d_1)}{2\pi \times l \times k_{\text{tubería}}} = \frac{\ln(16/12)}{2\pi \times 10 \times 0.35} = 0.013^\circ \text{C/W}$$

$$R_2 = \frac{\ln(d_3 / d_2)}{2\pi \times l \times k_{\text{aislamiento}}} = \frac{\ln(41.4/16)}{2\pi \times 10 \times 0.032} = 0.473^\circ \text{C/W}$$

Para  $R_3$ , necesitamos conocer el valor de  $\alpha$ , para ello empleamos lo siguiente:

$$\alpha_{\text{aire}} = \frac{Nu \times k_{\text{aire}}}{d_3}$$

Para conocer  $Nu$  podemos aplicar lo siguiente:

$$Nu = 0.36 + \frac{0.518 \times Ra^{0.25}}{\left(1 + \left(\frac{0.059}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}}$$

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g \times \beta \times (T_{\text{superficie}} - T_{\text{aire}}) \times d_3^2}{\nu^2} \times Pr$$

Para  $R_4$ :

$$R_4 = \frac{T_{\text{superficie}} - T_{\text{aire}}}{\varepsilon \times 2\pi \times l \times d_{\text{ext}} \times \sigma (T_{\text{superficie}}^4 - T_{\text{aire}}^4)}$$

**Tabla 23: Valores para el cálculo de resistencias térmicas**

Datos	Valor	Unidades
$d_3$	41.4	mm
$\beta$	1/263	1/K
$l$	10	m
$\nu$	$19.14 \times 10^6$	$\text{m}^2/\text{s}$
$Pr$	0.71297	

Empezamos a realizar los cálculos iterativos y encontramos que para la  $T_{\text{superficial}}$  igual a  $-5^{\circ}\text{C}$  cumple con todas las ecuaciones, reemplazamos en las expresiones de las resistencias para poder obtener los valores, los cuales son:

$$R_3 = 0.194^{\circ}\text{C} / \text{W}$$

$$R_4 = 0.078^{\circ}\text{C} / \text{W}$$

Reemplazamos en la expresión de transferencia de calor:

$$\overset{\circ}{Q}_{\text{pérdidas-aire}} = \frac{T_{\text{agua}} - T_{\text{aire}}}{R_1 + R_2 + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4}}$$

$$\overset{\circ}{Q}_{\text{pérdidas-aire}} = \frac{40 - (-17)}{0.013 + 0.473 + \frac{0.194 \times 0.078}{0.194 + 0.078}} = 105\text{W}$$

Se puede observar que el sistema pierde en un inicio 105W cuando la temperatura inicial del agua es de  $40^{\circ}\text{C}$ , pero esta temperatura empezará a disminuir lo que hará que la transferencia de calor vaya disminuyendo, para este caso se asumirá que siempre se va a perder y de ese modo estaremos en una posición conservadora y podremos verificar si el agua se puede llegar a congelar o no.

Entonces, como el sistema deja de funcionar a las 8pm aproximadamente y el sol empieza a calentar a partir de las 8am, podemos obtener la energía que se va a perder durante toda la noche considerando que hay 10m de tubería donde se encuentra agua en un inicio a  $40^{\circ}\text{C}$  la cual no queremos que se congele. Entonces:

Energía perdida por el agua:

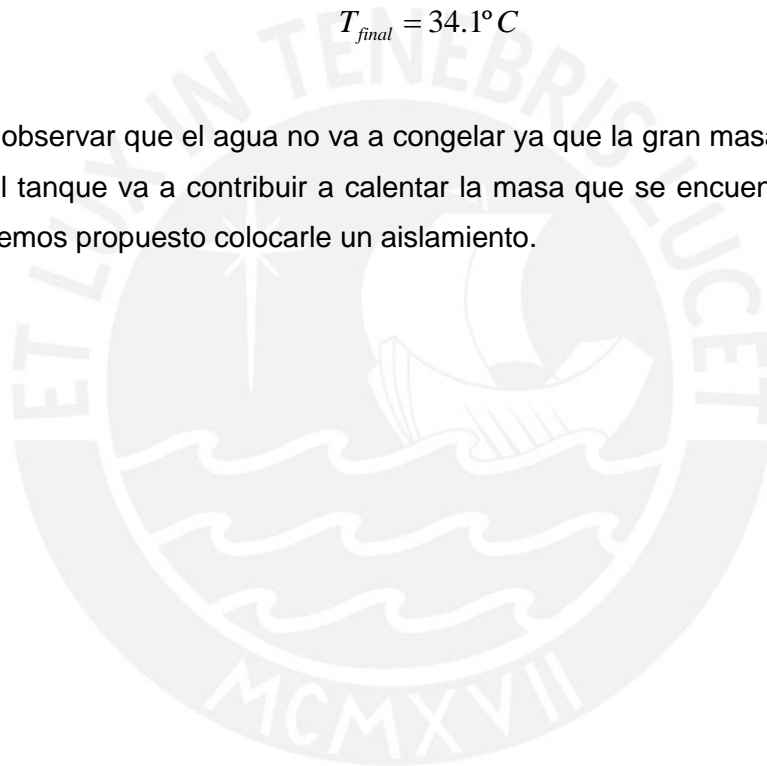
$$E_{\text{perdida}} = \overset{\circ}{Q}_{\text{pérdidas-aire}} \times \text{tiempo}$$

$$E_{\text{perdida}} = 105 \times 3600 \times 12 = 4.53 \times 10^6 \text{ J}$$

Hay que tener en cuenta que solamente los 10m de tubería estarán expuestas a la temperatura exterior de  $-17^{\circ}\text{C}$  pero esta tubería está conectada al tanque donde se encuentran los 180litros de agua, por ello, si la temperatura del agua empieza a disminuir hay una gran masa que puede asumir esas pérdidas, por ello, calcularemos hasta que temperatura disminuiría la temperatura de toda el agua.

$$E_{perdida} = C_p \times m \times (T_{inicial} - T_{final})$$
$$4.53 \times 10^6 = 4190 \times 180 \times (40 - T_{final})$$
$$T_{final} = 34.1^{\circ}\text{C}$$

Se puede observar que el agua no va a congelar ya que la gran masa de agua que se tiene en el tanque va a contribuir a calentar la masa que se encuentra en la tubería, además hemos propuesto colocarle un aislamiento.



## CAPÍTULO 4 COSTOS

### 4.1. Suelo Radiante

El precio de la tubería PEX fue proporcionado por la empresa ITALCASE y de la bomba de circulación por la empresa TRANSSEN.

<b>Materiales</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario (S/.)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio (S/.)</b>
Tecnopor	1.2mx2.4m	10.00	4	40.00
Concreto	m <sup>2</sup>	20.00	12	240.00
Tubería PEX 16x2	m	5	70	350.00
Capa de plástico	m <sup>2</sup>	0.5	12	6.00
Bomba de circulación	unidad	750	1	750.00
<b>TOTAL</b>				<b>1386.00</b>

#### 4.2. Colector solar

El precio ha sido proporcionado por la empresa TRANSEN.

Elemento	Unidad	Precio unitario (S/.)	Cantidad	Precio (S/.)
Colector solar con reservorio de 180 litros	1	3132.00	1	3132.00

#### 4.3. Sistema Fotovoltaico

El precio ha sido proporcionado por la empresa TRANSEN.

Elemento	Unidad	Precio unitario (S/.)	Cantidad	Precio (S/.)
Kit de panel 80 Wp con batería de 200 Ah, controlador e inversor.	1	2900.00	1	2900.00

#### 4.4. Costo Total

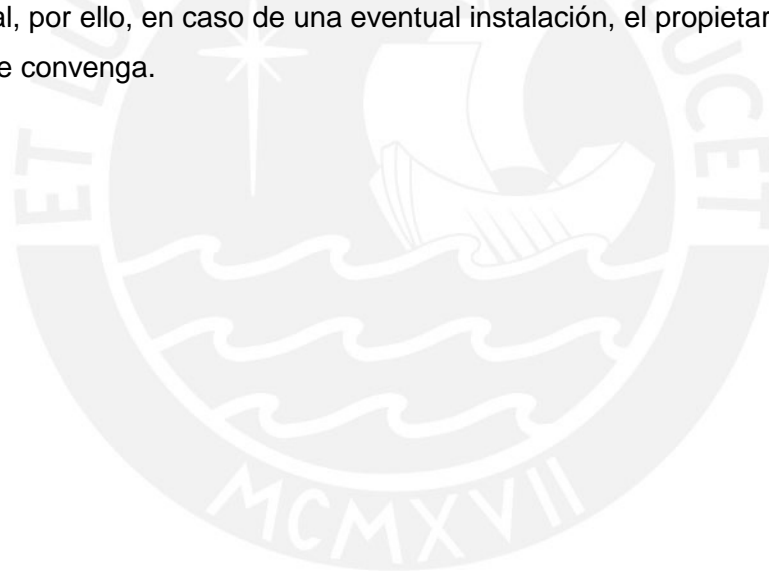
Para calcular el COSTO TOTAL, se tomarán en cuenta los costos obtenidos anteriormente, además hay que añadir los precios de algunos accesorios que se emplearán tales como válvulas y conexiones los cuales no llegan a superar los 100.00 nuevos soles. Además, hay que incluir el precio por el diseño y la mano de obra para realizar la instalación, en este caso solo tomaremos en cuenta el precio de diseño

Para el cálculo del costo de diseño de ingeniería consideraremos lo siguiente:

Precio por hora de diseño:	S/, 20.00
Horas de diseño por día:	2
Días tomados:	15
PRECIO DE DISEÑO:	S/. 900.00

Por lo tanto, el precio total de los materiales y el diseño (sin considerar el precio de instalación) asciende a 8318.00 nuevos soles

Ahora, si consideramos que podemos modificar algunos parámetros en el cálculo de los paneles fotovoltaicos, esto haría disminuir el precio del sistema, si se opta por tener dos días de autonomía el precio disminuye en 150 nuevos soles y si se opta por tener un día de autonomía precio disminuye en 100 nuevos soles con relación al precio total, por ello, en caso de una eventual instalación, el propietario podría elegir lo que más le convenga.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- El sistema funcionó, si bien es cierto la tesis no contempla construcción pero se logró instalar y probar. La temperatura alcanzada no fue la deseada (se alcanzó 13°C, lo deseado era 18°C), esto se debió a que el agua de ingreso al sistema no ingresaba la temperatura que se esperaba.

2.- Se pudo comprobar que el análisis por transferencia de calor y la norma DIN EN 1264, no difieren mucho (5.5%, ver en la página 58), con lo que se concluye que el análisis realizado estuvo bien, aunque se prefirió trabajar con el valor obtenido en la norma ya que el valor obtenido ahí fue un poco mayor y de esa manera se realizó un cálculo conservador.

3.- El sistema diseñado resulta amigable con el ambiente ya que no se realiza ninguna emisión de gases contaminantes ya que se emplea la energía solar al 100%, se hizo esto ya que en dicha casa se contaba con una terma solar y paneles solares de 150Wp de potencia.

4.- A manera de recomendación, ya que se sabe que el costo del sistema es elevado (8318.00 nuevos soles), un público objetivo podrían ser los hoteles ecológicos, que realizan sus actividades contaminando lo mínimo posible el medio ambiente, además el sistema de calefacción por Suelo Radiante ya viene siendo utilizado en hoteles de primer nivel tal como el hotel Las Casitas que se ubica en el Cañón del Colca ([http://www.lascasitasdelcolca.com.pe/web/ocol\\_es/las\\_casitas.jsp](http://www.lascasitasdelcolca.com.pe/web/ocol_es/las_casitas.jsp))

5.- A manera de recomendación, se podría sugerir realizar una tesis haciendo algunas variantes, como por ejemplo la forma de captar la energía solar; si bien es cierto en esta tesis se empleó un colector plano, sería bueno poder comparar la eficiencia y costo si es que se usara un colector SCHEFFLER que es una nueva tecnología que

se ha podido conocer en el GRUPO PUCP gracias al ingeniero francés Damien Puigserver.





## BIBLIOGRAFÍA

### [LIBRO 1]

ROZIS, Jean-Francois

1997 CALEFACCIÓN SOLAR PARA REGIONES FRÍAS: GUÍA TECNOLÓGICA DE APLICACIÓN PARA LA VIVIENDA Y AGRICULTURA EN PAÍSES EN DESARROLLO, Lima: ITDG-Perú,.

### [LIBRO 2]

SANCHEZ, Fernando

1992 INSTALACIONES DE CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE, Sevilla: PROGNSA.

### [LIBRO 3]

LIENHARD, Jhon

2002 A HEAT TRANSFER TEXTBOOK, Tercera Edición, Cambridge: Phlogiston Press,.

### [LIBRO 4]

PAHL, Gerhard and Beitz, Wolfgang,

1996 ENGINEERING DESIGN: A SYSTEMATIC APPROACH, Segunda Edición, London: Sprynger-Verlag.

### [LIBRO 5]

UPONOR

2009 MANUAL TÉCNICO DE INSTALACIONES DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN POR SUELO.

### [LIBRO 6]

LURBERO

2005 SUELO RADIANTE INTEGRAL, CATÁLOGO TÉCNICO.

[LIBRO 7]

GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL

2008 INFORME CASA ECOLÓGICA ANDINA

[LIBRO 8]

DEUTSCHES INSTITUT FUER NORMUNG

2009 Norma DIN EN 1264-3:2009

[LIBRO 9]

DEUTSCHES INSTITUT FUER NORMUNG

2003 Norma DIN EN 12831:2003

#### SITIOS WEB CONSULTADOS

[1] Sitio Web de INEI:

[http://censos.inei.gob.pe/documentosPublicos/Informe\\_Tecnico\\_Pobreza2007.pdf](http://censos.inei.gob.pe/documentosPublicos/Informe_Tecnico_Pobreza2007.pdf),  
INFORME TÉCNICO DE POBREZA 2007. [Fecha de revisión: 20 de mayo del 2009]

[2] Sitio Web Wikipedia:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b3/EM\\_Spectrum\\_Properties\\_es.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b3/EM_Spectrum_Properties_es.svg)  
, ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. [Fecha de revisión: 24 de junio del 2009]

[3] Sitio Web Wikipedia:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Solar\\_Spectrum.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Solar_Spectrum.png),  
RADIACIÓN SOLAR. [Fecha de revisión: 24 de junio del 2009]

[4] Sitio Web Industrial Blansol:

[http://www.blansol.es/suelo\\_radiante/regulacion\\_calefaccion\\_sueloradiante\\_01.html](http://www.blansol.es/suelo_radiante/regulacion_calefaccion_sueloradiante_01.html),  
REGULACIÓN DE UNA CALEFACCIÓN POR UN SUELO RADIANTE. [Fecha de  
revisión: 24 de mayo del 2009]

[5] Sitio Web Contrumatica:

[http://www.construmatica.com/construpedia/Confort\\_T%C3%A9rmico](http://www.construmatica.com/construpedia/Confort_T%C3%A9rmico) , CONFORT  
TÉRMICO. [Fecha de revisión: 27 de marzo del 2010]

[6] Sitio Web Entropideces:

<http://www.entropideces.com/2009/01/solo-pongo-la-puntita-de-la-lena.html> [Fecha de revisión: 27 de mayo del 2010]

[7] Sitio Web Grupo de Apoyo al Sector Rural:

<http://www.pucp.edu.pe/grupo/Friaie.htm> [Fecha de revisión: 27 de mayo del 2010]

[8] Sitio Web Wikipedia:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Vieux\\_la\\_Romaine\\_Villa\\_hypocauste.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Vieux_la_Romaine_Villa_hypocauste.jpg) [Fecha de revisión: 27 de mayo del 2010]

[9] Sitio Web Worldatlaspedia:

[http://www.worldatlaspedia.com/zh/departamento-de-cusco/lugares\\_reconditos30/busquedaLibreDetalle-0-6945633](http://www.worldatlaspedia.com/zh/departamento-de-cusco/lugares_reconditos30/busquedaLibreDetalle-0-6945633) [Fecha de revisión: 01 de octubre del 2010]

[9] Sitio Web Montana Green Power:

[http://www.montanagreenpower.com/faq/img/active\\_closed\\_loop\\_solar\\_wa.gif](http://www.montanagreenpower.com/faq/img/active_closed_loop_solar_wa.gif) [Fecha de revisión: 01 de octubre del 2010]

[10] Sitio Web Ingeniería Civil y Planeamiento Urbanístico:

<http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20CIVIL%20Y%20PLANEAMIENTO/HH06.htm> [Fecha de revisión: 10 de Setiembre del 2010]

ESTRUCTURA DE FUNCIONES (imágenes empleadas)

Colector plano [http://energia-](http://energia-solar.com.mx/tienda/images/Thermo_Siphon_Flat_Solar_Water_Heater.jpg)

[solar.com.mx/tienda/images/Thermo\\_Siphon\\_Flat\\_Solar\\_Water\\_Heater.jpg](http://energia-solar.com.mx/tienda/images/Thermo_Siphon_Flat_Solar_Water_Heater.jpg)

Colector cilíndrico

<http://www.solarmillennium.de/cache/6242e3d85dfb9b0cfecb87a891fe1a1c.jpg>

Caldera [http://www.girasolar.es/IMG/jpg/Caldera\\_de\\_pellets.jpg](http://www.girasolar.es/IMG/jpg/Caldera_de_pellets.jpg)

Tanque cilíndrico <http://www.ceba.com.co/images/F8MN.jpg>

Bomba [http://img.nauticexpo.es/images\\_ne/photo-g/bomba-electrica-para-agua-de-desague-de-ducha-para-barcos-195029.jpg](http://img.nauticexpo.es/images_ne/photo-g/bomba-electrica-para-agua-de-desague-de-ducha-para-barcos-195029.jpg)

Efecto termosifón

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Thermosiphon2.png>

Panel solar

[http://api.ning.com/files/CNFWASjWYL4WK2IDlobj0XdrSUPxFugwzEqptw-oyJEL-09qd3peU83r6O8LuL0yl8gcdj7H7e-rtBLkzYWc0TjwO6ow\\*DI/PanelSolar.jpg](http://api.ning.com/files/CNFWASjWYL4WK2IDlobj0XdrSUPxFugwzEqptw-oyJEL-09qd3peU83r6O8LuL0yl8gcdj7H7e-rtBLkzYWc0TjwO6ow*DI/PanelSolar.jpg)

Eolica [http://www.freefoto.com/images/39/12/39\\_12\\_55---Lowestoft-Wind-Turbine\\_web.jpg](http://www.freefoto.com/images/39/12/39_12_55---Lowestoft-Wind-Turbine_web.jpg)

Pelton <http://www.fdppa.org/images/repository/TL%20Pelton%20Wheel.jpg>

Manos <http://educationcs.files.wordpress.com/2008/12/helping-hand.jpg>