



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE CALEFACTORES
SOLARES PARA PROYECTOS DE COOPERACIÓN AL
DESARROLLO**

Alumno:

Javier Allanegui Garnelo

Directores:

Victor Tabuenca Cintora

Beatriz Rodríguez Soria

Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

ZARAGOZA, mayo de 2013

Índice

1	ANTECEDENTES	4
2	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	6
2.1	OBJETIVOS	6
2.2	METODOLOGÍA	6
3	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA COMUNIDAD	8
3.1	ÁMBITO TERRITORIAL	8
3.2	LÍMITES DEL CASERÍO.....	9
3.3	CLIMA	10
3.4	RELIEVE, VEGETACIÓN Y FAUNA.....	10
3.5	VÍAS DE ACCESO Y COMUNICACIÓN.....	10
3.6	DISTRIBUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS.....	11
3.7	SERVICIOS BÁSICOS.....	11
3.7.1	<i>Agua y Saneamiento.....</i>	<i>11</i>
3.7.2	<i>Servicio de energía para alumbrado en las viviendas</i>	<i>12</i>
3.8	CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN.....	12
3.9	DESARROLLO DE CAPACIDADES.....	13
3.10	INGRESO FAMILIAR.....	13
4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	14
4.1	CONCEPTOS GENERALES	14
4.2	PROCESO DE TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN SOLAR	15
4.3	TECNOLOGÍA MURO TROMBE	18
4.3.1	<i>Importancia de la Inercia Térmica.....</i>	<i>19</i>
4.3.2	<i>Efecto termosifón</i>	<i>20</i>
5	DISEÑOS.....	21
5.1	VERTICAL	21
5.2	INCLINADO	22
5.3	HORIZONTAL.....	23
5.4	INVERNADERO.....	24
5.5	LATAS.....	26
5.6	ALAMBRES Y PIEDRAS.....	27
6	ANÁLISIS COMPARATIVO	28
6.1	VIDRIO Y PLÁSTICO	28
6.2	COMPARACIÓN CUALITATIVA DE MODELOS ARTESANOS	29
7	ELECCIÓN	31
7.1	ELECCIÓN DEL MODELO APROPIADO.....	31
7.2	ELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN.....	32
8	ESTUDIO CLIMATOLÓGICO Y TERRITORIAL.....	34
8.1	INTERVALOS DE TEMPERATURAS AMBIENTALES	34
8.2	RADIACIÓN.....	34
8.3	PRECIPITACIONES.....	35
8.4	VIENTO.....	35
8.5	ORIENTACIÓN	35
8.6	SOMBREAMIENTOS	36
9	DIMENSIONADO	37
9.1	HERRAMIENTAS PARA EL DIMENSIONADO	37
9.1.1	<i>Área horizontal y vertical del muro:</i>	<i>38</i>

9.1.2	<i>Inclinación y longitud de la base:</i>	38
9.1.3	<i>Nº de orificios y diámetro:</i>	39
9.2	APLICACIÓN AL CASO	40
9.2.1	<i>Cálculo teórico en base a las herramientas dadas</i>	40
9.2.2	<i>Justificación estructural</i>	41
9.2.3	<i>Análisis de los sombreamientos</i>	44
9.3	PRESUPUESTO: MATERIALES Y HERRAMIENTAS	46
10	SIMULACIONES TÉRMICAS	47
10.1	OBJETIVOS	47
10.2	METODOLOGÍA	47
10.3	MODELOS ANALIZADOS	48
10.4	RESULTADOS	50
10.4.1	<i>Estado Actual</i>	50
10.4.2	<i>Casa con Invernadero</i>	51
10.4.3	<i>Casa con Invernadero y sellado</i>	52
10.4.4	<i>Casa con Invernadero, sellada y aislada</i>	53
10.4.5	<i>Modelo CFD del dormitorio</i>	54
10.4.6	<i>Modificaciones del aislamiento y la masa térmica</i>	56
10.5	CONCLUSIONES	57
11	INSTALACIÓN	59
12	CONCLUSIONES GENERALES	60
13	BIBLIOGRAFÍA	61

1 Antecedentes

La energía solar se presenta como una solución atractiva a los problemas energéticos de los países en desarrollo, en los que la intensidad de la radiación frecuentemente es alta. Su explotación es tecnológicamente simple y, por su naturaleza descentralizada.

Se pueden distinguir tres formas de utilización de energía solar:

- Energía solar para transformar biomasa por fotosíntesis.
- Energía solar transformada en electricidad (fotovoltaica).
- Energía solar transformada en calor.

Centrándonos en esta última, observamos que tiene muchos y muy diferentes usos, entre los más difundidos y las aplicaciones más importantes de la energía solar térmica, tenemos por ejemplo; calentamiento de agua para uso doméstico, cocción de alimentos, secado de productos agrícolas, desalinización de agua, esterilización de instrumentos clínicos, refrigeración y calefacción de viviendas, entre otros.

La instalación de sistemas de calefacción solar, son una alternativa para las zonas rurales aisladas que cuenten con aceptables índices de radiación solar. Bajo esta premisa se plantea la instalación de muros Trombe dentro del proyecto Pucara II, que Ingeniería sin Fronteras Aragón y Practical Action, llevan a cabo en el caserío de Pucara, del distrito de Tumbaden, provincia de San Pablo, en Cajamarca, Perú.

La tecnología propósito de este documento, los Muros Trombe, nacen de la necesidad de aumentar las temperaturas en el interior de las viviendas en las noches altoandinas, donde las mínimas pueden rondar los 0° C. Estas condiciones, sumadas a las casi inexistentes medidas de aislamiento en las viviendas, provocan graves problemas de salud sobre todo en los más pequeños, además de afectar muy negativamente a la calidad de vida de estas comunidades.

La implementación de la tecnología muro Trombe, tiene una base legal sustentada en el Decreto de Urgencia N° 019-2008 (04.06.08) donde se declara de Interés Nacional la implementación y aplicación de la tecnología alternativa de calefacción "Sistema Pasivo de Recolección de Energía Solar de Forma Indirecta" denominada MURO TROMBE.

El trabajo que a continuación se expone comenzó en agosto de 2011 con el diagnóstico y análisis sobre el tipo de muro Trombe que podría ser más conveniente para zonas rurales altoandinas aisladas, que se adecuara a las condiciones climáticas y sociales del entorno, y cubra las necesidades existentes. Tomándose como referencia estudios y experiencias realizadas en Perú, por otras organizaciones, así como el estudio propio de los requisitos del sistema en función de las condiciones de su futuro emplazamiento. A partir de estos estudios se calculó y diseñó la tecnología que finalmente cumplía los requerimientos y se instaló un muro Trombe piloto los primeros días de octubre de 2011, después de haber realizado la pertinente identificación sobre el terreno.

En objetivo final de este proyecto es la instalación de varios Muros en el mismo caserío, así como impulsar y promover la capacidad de que esta misma tecnología sea replicada por los propios beneficiarios y reconocida por los gobernantes de las distintas municipalidades de la zona. Además de realizar talleres explicativos sobre el funcionamiento, repercusión y cuidados, se convocó a todo el que estaba interesado, a acudir a la instalación del Muro Trombe piloto, a fin de conseguir involucrarles más en el entendimiento del funcionamiento, montaje y mantenimiento.

La utilización de los Sistemas Pasivos de Recolección de Energía Solar de Forma Indirecta en el Perú:

Son varios los ejemplos de utilización de estos sistemas en Perú y muchos también los ejemplos de utilización de los muros Trombe para acondicionar viviendas altoandinas. Uno de los organismos

que más experiencia tiene en la instalación de muros Trombe, es el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO). Este organismo fue protagonista de la Resolución Ministerial N°627-2008-VIVIENDA (30.09.08) del Gobierno de Perú, en la que se aprueba una transferencia financiera de 15.4 millones de soles a favor de SENCICO, para desarrollar la capacitación y aplicación de técnicas para la instalación de muro Trombe en zonas alto andinas. Con este presupuesto se abarca la instalación de 17.714 calefactores ubicados a más de 3.500 m de altura, en las zonas de Arequipa, Cusco, Huancayo, Ica, Puno y Tacna, según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

En un primer juicio, parecen ser el referente en el cual apoyarse, para la iniciación de un proyecto de muros Trombe. Son muchos los medios de comunicación que han hablado maravillas de los resultados de la instalación de calefactores por parte del SENCICO, cifrando el incremento medio de las temperaturas dentro de las viviendas, en 15° C. Pero también son muchas las voces, más independientes que los medios, que arremeten duramente contra los resultados de esta tecnología tal y como se está instalando.

Una de estas voces, es la del Ingeniero Miguel Hadzich, profesor de la PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú) y director del Grupo de apoyo al sector rural, quién opina acerca de la instalación de muros Trombe de la mano de SENCICO, dando una valoración muy negativa a la misma. Según su experiencia, incluidas visitas a las comunidades en cuestión, los muros se están instalando mal principalmente por que no se orientan, se ponen en muchas ocasiones, en cualquier muro de la casa. Haciendo una similitud con otras tecnologías más conocidas, hacer un muro Trombe que no esté orientado en dirección del sol, sería próximo a instalar un aerogenerador en una zona donde nunca hubiera viento.

Además de la orientación, la inclinación es otro factor fundamental para el buen funcionamiento de estos calefactores. El proyecto del SENCICO instala muchos de sus muros Trombe con 90° de inclinación, es decir, verticales, en un país donde el radiación del sol tiene una inclinación de alrededor de 83°, algo que no tiene mucha lógica si de verdad se ha estudiado el tema.

SENCICO no solo ejerce como parte ejecutora en la instalación de muros Trombe, también certifica la validez técnica de los calefactores. Es así como en la presentación sobre «La Participación comunitaria en la implementación de muros Trombe editado en Abril de 2009 por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) se establece que «en el marco del Proyecto UNETE, la OPS puso en marcha la tecnología muro Trombe en comunidades de Cusco y Puno, cuya validez técnica fue demostrada por el SENCICO y el SENAMHI»

Otra experiencia más lógica, es por ejemplo la de la PUCP y su Grupo de apoyo al sector rural, en comunidades como Langui o Yanaoca en Cusco, que propone un diseño inclinado a 70° y con plástico, que abarata drásticamente los costes. Basándonos en su experiencia en la instalación de calefactores, siguiendo algunas de sus publicaciones (Koñiwasi - Casa caliente) y con su apoyo para resolver cualquier tipo de duda, se ha intentado elaborar un estudio que concluya con un diseño apropiado para la instalación de esta tecnología en el caserío de Pucara.

2 Objetivos y metodología

2.1 Objetivos

- Recopilar y clasificar información de los distintos modelos de muro Trombe aplicables en una localización concreta, así como los mejores materiales para su construcción, atendiendo a las características técnicas y socioeconómicas de los mismos.
- Elaborar y argumentar el proceso de elección de la tecnología más apropiada para el entorno y las circunstancias de un caso real, enmarcado en un proyecto de cooperación.
- Aportar los conocimientos y herramientas necesarias para el proceso de diseño e instalación de muros Trombe, en cualquier localización existente.
- El documento final debe servir como manual, proporcionando las herramientas necesarias para la implementación de estos sistemas solares pasivos.
- Demostrar la validez de la tecnología elegida, comprobando los aumentos de confort debidos a la instalación de la misma, gracias a la simulación del progreso de las temperaturas anuales para cada uno de los casos de interés.
- Llevar a cabo la instalación de un calefactor solar.

2.2 Metodología

En primer lugar se ha realizado un diagnóstico de la comunidad donde se pretenden instalar nuestros calefactores solares. Este trabajo se realizó en sintonía con los trabajadores de la ONGD, Soluciones Prácticas Cajamarca, que viene trabajando tiempo atrás en la zona en cuestión. Se basa en un diagnóstico muy desactualizado que se realizó con motivo del programa de instalación de regadíos que se llevó a cabo en el caserío de Pucara, y fue debidamente actualizado durante el mes de Julio de 2011, con la ayuda de sociólogos de la asociación antes citada.

Una vez recabadas y ordenadas las características del territorio, se procedió a valorar las diferentes opciones tecnológicas existentes para aumentar las temperaturas de las viviendas gracias a la captación de energía solar. Se valoraron las condiciones técnicas y socio-económicas de cada una, así como se elaboraron presupuestos precisos de las mismas, expresados en función de los precios y la moneda local.

Examinadas todas las tecnologías se realizó una comparación de las propiedades de cada una, en la que se incluyó un breve estudio sobre los distintos materiales posibles para la elaboración de la superficie de captación. De este análisis comparativo, surge un proceso razonado y argumentado de elección, que culmina con la elección del modelo más apropiado para el caso que nos ocupa.

La siguiente fase fue sumergirnos en el proceso de estudio más profundo de las características climatológicas y territoriales que condicionan directamente el futuro diseño de nuestro sistema (Temperaturas, radiación, relieves...).

Consecuencia de un adecuado trabajo en el anterior apartado, comenzamos el diseño. Para ello nos basamos principalmente en la experiencia de algunas organizaciones peruanas en la instalación de este tipo de muros Trombe, en concreto, se mantuvo contacto con el Grupo de apoyo al sector rural de la Pontificia Universidad Católica de Perú, en Lima. Se coordinó con ellos un proceso de formación en el que se incluían todos los estudios y experiencias que ellos habían adquirido sobre el tema y una visita de 3 jornadas, del 1 al 3 de agosto de 2011, con la investigadora Urphy Vazquez.

Compilado e interiorizado el material, se pasó a la aplicación de dichas herramientas de dimensionamiento a un caso práctico, enmarcado dentro del proyecto de cooperación al desarrollo “Mejora de las condiciones de vida de los habitantes del caserío de Pucara”, que ISF y Soluciones Prácticas ejecutan coordinadamente. Para la toma de medidas, búsqueda de orientación y el resto de las actividades previas a la instalación, se trasladó el equipo necesario el día 15 de septiembre.

Con nuestro diseño realizado, se procedió a la simulación de dicho modelo, a fin de verificar su correcto funcionamiento, tanto como establecer una correcta secuencia de actuación durante la instalación.

Para ello se simuló el efecto de las sombras en nuestro sistema con el programa Google Sketch Up 8, con el que se determinó que nuestro captador recibe suficiente insolación durante prácticamente la todo el año.

Para las simulaciones térmicas se realizó un modelo con Design Builder 2.3.6.005 con el motor de cálculo ENERGY PLUS 6.0.0.023. Con los resultados de dichas simulaciones se elaboraron las necesarias tablas y gráficas con la hoja de cálculo Microsoft Excell 2010.

Por último, nuestro calefactor solar se instaló, los días 5, 6 y 7 de octubre de 2011.

3 Características generales de la comunidad

En este apartado se ha realizado un concienzudo diagnóstico de las características climáticas, territoriales y socio-económicas de la comunidad, con el fin de aportarnos información útil para la correcta elección de nuestra tecnología, así como para la adecuada implementación de la misma.

Los datos para realizar dicho diagnóstico, fueron recopilados para la planificación del proyecto, y han sido complementados por los datos surgidos de talleres y reuniones con la comunidad, durante los meses de agosto y septiembre de 2011.

3.1 Ámbito Territorial

El caserío Pucará pertenece al distrito de Tumbadén, en la provincia de San Pablo, está enmarcado administrativa y políticamente dentro de la Región de Cajamarca.

Su extensión geográfica es compleja y presenta áreas que se encuentran entre los 3.100 a 4.000 msnm aproximadamente.



Mapa de la Región Cajamarca y Ubicación de la Provincia de San Pablo,
Fuente: Plan de Acondicionamiento Territorial de la Provincia de San Pablo

3.2 Límites del Caserío

El Caserío de Pucará limita:

- Por el Norte: con el distrito de San Silvestre de Cochán, Provincia de San Miguel.
- Por el Sur: con el distrito de Chetilla, Provincia de Cajamarca.
- Por el Este: con el caserío el Progreso, distrito de Tumbadén, Provincia de San Pablo.
- Por el Oeste: con el caserío Peñan Blanca, distrito de Tumbadén, Provincia de San Pablo.



1 Mapa de la Provincia de San Pablo y Ubicación de Caserío Pucará

3.3 Clima

El Caserío de Pucará presenta un clima templado y seco debido a la altitud en la que se encuentra ubicada, su temperatura media fluctúa entre los 11°C y los 17°C. Las precipitaciones en la comunidad de Pucará son con mayor intensidad entre los meses de diciembre a marzo. También se presentan fuertes heladas, sobre todo entre los meses de Junio a Noviembre, cuando se inicia el “verano”, llamado así por los pobladores de la zona debido al inicio de la temporada de estiaje.

3.4 Relieve, Vegetación y Fauna

El relieve que presenta el caserío Pucará es accidentado, presentando un paisaje con laderas suaves y pronunciadas. Las faldas de los cerros presentan laderas y pendientes variablemente inclinadas.

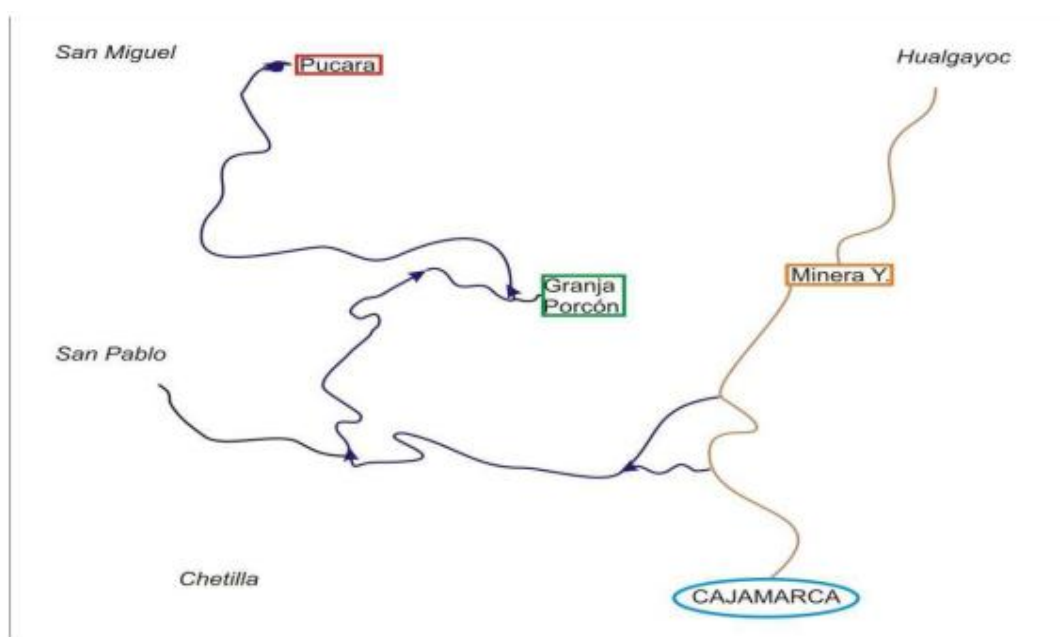
Son tierras con pastos naturales y afloramientos rocosos. La escasa vegetación de la zona está constituida principalmente por plantas como el Quinua y pequeños arbustos.

En cuanto a la fauna del lugar, las especies más comunes son: el zorzal negro, patos, gallinazos, perdices, el cuy, la trucha (introducida) y la vizcacha.

3.5 Vías de Acceso y Comunicación.

Para llegar al caserío de Pucará se toma un desvío ubicado a la altura del Km. 24 carretera Cajamarca – Bambamarca. En siguiente cuadro se detallan el tipo de vía, las distancias y el tiempo requerido para llegar a la comunidad.

Tramo		Tipo de Vía	Distancia aproximada	Tiempo Aproximado
Desde	Hacia			
Cajamarca	Km 24 carretera Bambamarca	Asfaltada - afirmada	24 km	1:30 horas
Km 24	Granja Porcón	Pista tierra	11,5 km	40 min
Granja Porcón	Caserío Pucara	Pista tierra	15 km	50 min



Croquis camino Cajamarca - Pucara

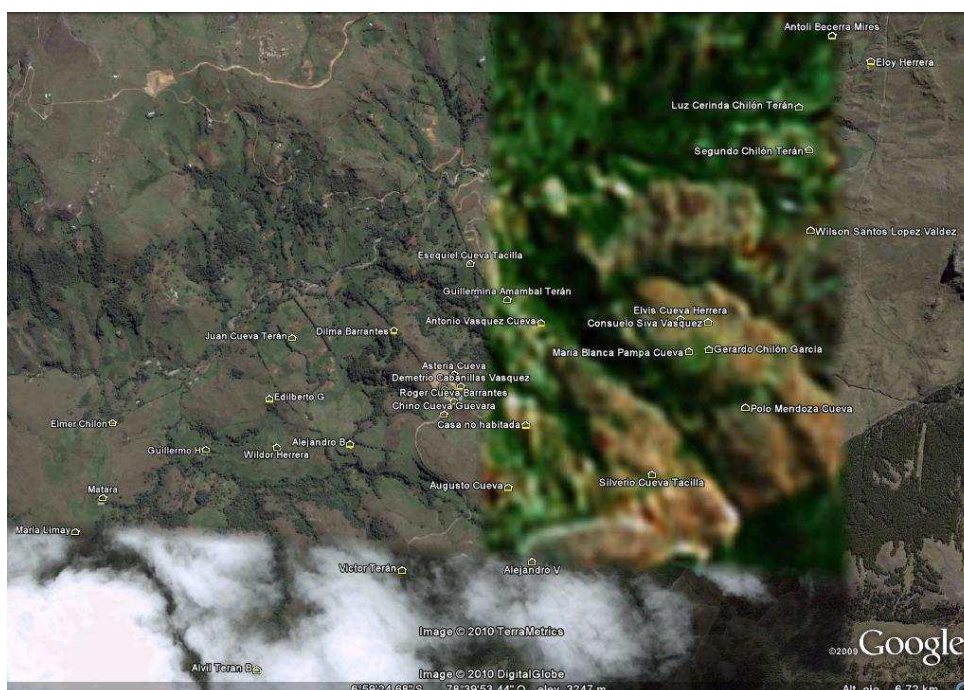
3.6 Distribución y características de las Viviendas.

En la comunidad de Pucará tiene 51 viviendas, generalmente con grandes separaciones entre si, características propias de las viviendas rurales en esta parte de la Región Cajamarca.

En general, el material predominante con el que han sido construidas las viviendas del caserío es piedra con barro y tapial, y en su totalidad los techos son de calamina con pisos de tierra. En promedio se tienen tres habitaciones por vivienda.

La cocina suele estar en un cuarto aparte dentro de la vivienda y el fogón suele estar hecho de piedra.

Es notorio que al centro de la comunidad existe una pequeña concentración de viviendas, la iglesia evangélica y una casa comunal (13 edificaciones en total) que giran alrededor de la I.E primaria, las demás se encuentran dispersas.



Mapa de la distribución de las viviendas. Fuente: Google Earth

3.7 Servicios Básicos.

3.7.1 Agua y Saneamiento.

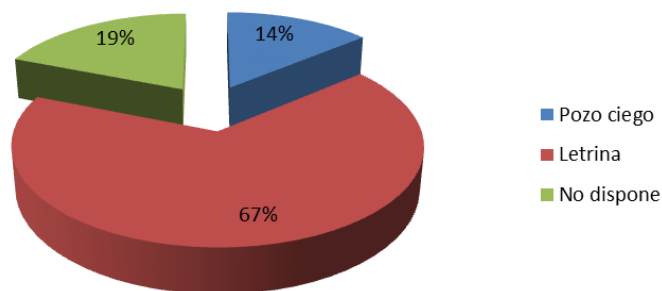
El caserío de Pucará cuenta con el servicio de agua potable, el mismo que ha sido recientemente mejorado, con el apoyo de la Municipalidad de Tumbadén y de Soluciones Prácticas; a pesar de ello aún faltan por realizar acciones complementarias. En términos porcentuales, el 94% de las viviendas a la fecha disponen ahora del servicio de agua potable, sistema que anteriormente solo disfrutaba el 38% de las familias.

Se ha podido verificar que en las viviendas, las familias no disponen de lavaderos apropiados, los grifos están en su mayoría fijados a un palo y o disponen de pozos en mal estado que están ubicados distantes a la vivienda.

Del total de viviendas (51) aún existen 3, que son las más alejadas de la comunidad, que no disponen de servicio de agua potable, se abastecen de un manantial,

Están pendientes acciones concretas para mejorar el sistema de agua potable y que por falta de presupuesto no se han concluido (cambio parcial de la tubería del actual sistema, provisión de pozos a las viviendas que disponen del servicio de agua potable y la construcción de un pequeño sistema para abastecer a 3 viviendas)

En su mayoría las familias cuentan con letrinas (76%) (se encuentran en mal estado debido al tiempo de uso), además, hay familias que cuentan con pozos ciegos (14%) y otras familias (19%) que acuden directamente al campo para realizar sus necesidades fisiológicas.



*Distribución del tipo de saneamientos en la comunidad.
Fuente: Encuesta Socioeconómica ITDG – Marzo 2010*

Se considera un tema urgente por resolver, la provisión de servicios de saneamiento, a través de letrinas con otro sistema de mantenimiento, para hacerlas más saludables y menos contaminantes.

3.7.2 Servicio de energía para alumbrado en las viviendas

Las familias hacían uso de manera generalizada de: velas, pilas, queroseno y baterías, como fuentes de energía para iluminación y para el funcionamiento de algunos pequeños electrodomésticos, principalmente radios. Del total de 51 viviendas que existen en la comunidad se ha podido constatar que 9 cuentan con paneles solares instalados por Perú Micro Energía, éstos no satisfacen las necesidades básicas de las familias, sólo les permite alumbrado y el funcionamiento de una radio..

3.8 Características de la Población.

La comunidad de Pucará tiene una población total de 224 habitantes en 36 familias, con las siguientes características:

- La población de Pucará es relativamente uniforme en cuanto a la distribución de grupos de edades; siendo la población joven (la que comprende desde los 0 a 24 años) la que tiene mayor porcentaje con un 62%, frente a la población de 25 años a más con un 38%. Los grupos con mayor porcentaje se encuentran de 0-6, 7-12, 13-18 años; con un 16.5% y el grupo con menor porcentaje es el grupo de 31 – 36 con un 5%.
- Por sexo, la población es en su mayoría femenina con un 51%, frente a una 49 % masculina.
- El grado de instrucción que tiene un mayor porcentaje es Primaria Incompleta, con un 28.6% para el caso de los hombres y 32.2% para el de las mujeres, seguido de la primaria completa para los hombres, con un 23.2% y la secundaria incompleta para en las mujeres con un 16.9%.

- El promedio de integrantes por familia es de 5.7 personas.
- En promedio, hay 1 familia por cada vivienda.

3.9 Desarrollo de Capacidades.

El factor capacitaciones se demuestra muy bajo, dado que en el 67% de las familias encuestadas ningún miembro de las mismas no ha recibido ningún tipo de capacitación técnica. En cuanto al resto de familias, es predominantemente que el padre o la madre sean los encargados de capacitarse en temas muy diversos relacionados con el ámbito rural.

Aun así, se observa que el 100% estaría interesado en invertir parte de su tiempo en capacitarse técnicamente en distintos ámbitos, siendo mayoritariamente la agricultura y la ganadería los ámbitos en que la población está más interesada en evolucionar. De todos los encuestados, un 81% estaría también dispuesto a invertir dinero en su capacitación, siempre dentro de sus posibilidades económicas.

Con respecto a temas empresariales, sólo uno de los encuestados cuenta con una empresa formalizada, dedicada al transporte, de la cual es el gerente. Cabe mencionar el deseo de la población en capacitarse en un futuro sobre temas de manejo de cultivos y de pastos, así como manejo de animales, para que de este modo se puedan generar sus propios recursos.

3.10 Ingreso Familiar.

La principal fuente de ingresos para los pobladores del caserío proviene de la venta de leche a la empresa Gloria y en mínima cantidad a la empresa Nestlé, ya que por la agricultura no se recibe algún ingreso debido a que lo producido por esta actividad se destina al autoconsumo.

La venta de animales menores no significa un ingreso permanente y cuantioso.

En promedio, y de manera general, una familia percibe mensualmente S/. 790 soles, monto que refleja las carencias y la pobreza que caracteriza a la comunidad.

4 Fundamentos teóricos

4.1 Conceptos generales

Antes de profundizar más en el funcionamiento de esta tecnología, conviene aclarar el significado de distintos términos frecuentemente utilizados para hablar del recurso solar:

Irradiancia solar (I): Es la energía que incide por unidad de tiempo sobre una determinada superficie de terreno. Su valor está dado por unidad de tiempo, por lo que hace referencia al concepto de potencia y la unidad empleada para referirnos a ella es W/m^2 y sus múltiplos.

Irradiación o Radiación solar (H): Se obtiene al integrar la irradiancia entre un determinado tiempo inicial y final, por tanto constituye la energía que incide sobre una determinada superficie. Tiene unidades de energía por lo que se expresa empleando: Wh/m^2 o J/m^2 y sus múltiplos.

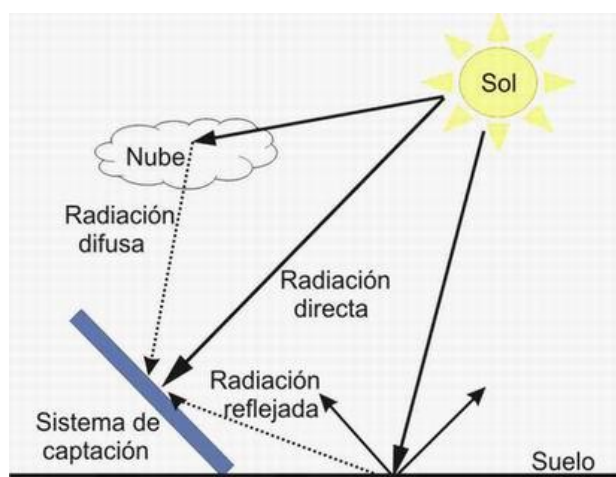
Radiación directa (HD): Su procedencia es directamente del sol, no ha sufrido ningún tipo de modificación, este tipo de radiación tiene una única dirección de incidencia y por tanto posee la particularidad de que puede ser concentrada.

Radiación difusa (Hd): Su procedencia no es directa del sol, esta radiación ha sufrido cambios de dirección debidos a las reflexiones y refracciones que se producen cuando atraviesa la atmósfera. Esta radiación pues procede de la bóveda celeste. La radiación difusa no tiene una única dirección de incidencia y por tanto no se puede concentrar.

En días bastante nublados, está radiación, es la que permite seguir funcionando a los sistemas solares, evidentemente, con menos rendimiento.

Radiación reflejada (Hr): Es la componente de la radiación que procede de la reflexión producida por los elementos de la superficie terrestre y el valor de esta reflexión dependerá del coeficiente de reflexión o albedo que tenga la superficie.

Radiación global: Es la radiación total que se obtiene de la suma de; la radiación directa, la difusa y la reflejada.



$$H_g = H_D + H_d + H_r$$

Trayectoria solar: es un concepto dependiente de la variabilidad del ángulo que forma el eje de rotación de la tierra, que no siempre es perpendicular, con el plano de su trayectoria de traslación

con respecto al sol. La inclinación de este eje es lo que produce las estaciones del año, las variaciones en horas solares y el ángulo de la radiación solar

Inercia térmica: es la capacidad que tiene la masa de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente, disminuyendo de esta forma la necesidad de aportación de climatización. Es muy importante para conseguir una estabilidad térmica en los edificios, y su consecuente confort.

4.2 Proceso de transmisión de calor por radiación solar

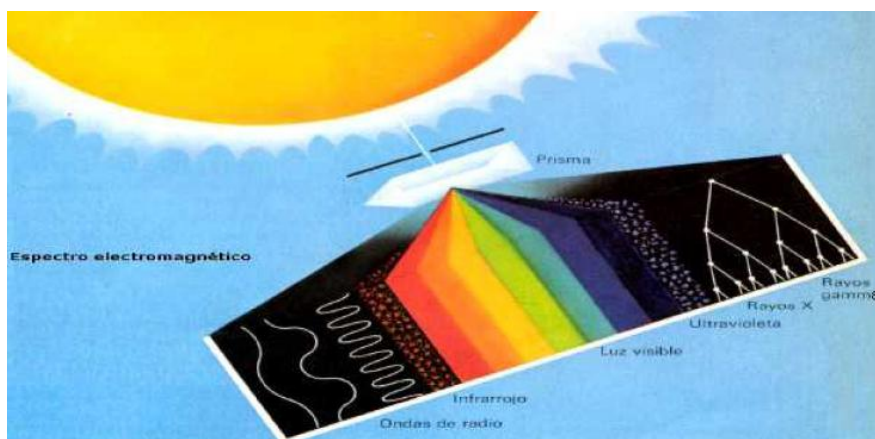
Llamamos radiación a la emisión continua de energía radiante por un cuerpo, un claro ejemplo de radiación, es la emitida por el sol. Para poder comprender mejor como la energía procedente del Sol interactúa con la atmósfera de la tierra y la superficie terrestre, se deben de conocer las leyes básicas que rigen la radiación:

- Todos los objetos con temperatura mayor de 0° K emiten energía radiante, como por ejemplo el Sol, las personas o la Tierra.
- Los objetos con mayor temperatura radian más energía por unidad de superficie que los objetos fríos, así por ejemplo el Sol cuya temperatura media es de 5.800 K emite en su superficie $64.000.000 \text{ W/m}^2$ y en cambio la Tierra, cuya temperatura media en superficie es de 15 K, emite aproximadamente 390 W/m^2 .
- Los cuerpos con mayor temperatura emiten una radiación de longitud de onda más corta.

La energía que recibimos del sol llega en forma de ondas electromagnéticas, por lo que no necesitan medio material para su propagación, puede transmitirse aun en el vacío. La velocidad a la que se desplazan en el vacío es $c = 300.000 \text{ km/s}$, Por tanto considerando una distancia media entre el sol y la tierra de $1 \text{ AU} = 149.800.000 \text{ km}$, tenemos que la energía solar tarda en llegar a la tierra de manera aproximada 500 segundos o lo que es lo mismo, poco más de 8 minutos.

El comportamiento de las ondas electromagnéticas se rige por la longitud de onda λ y por su frecuencia ν .

El sol emite radiación en todas las longitudes de onda existentes, aunque la mayor parte de la energía llega a la tierra en forma de radiación del espectro visible e infrarrojo (7 % ultravioleta, 47,3 % visible y 45,7 % infrarrojo)



Espectro de la radiación emitida por el sol.

La radiación se estudia como un flujo de partículas denominadas fotones, que al incidir las ondas en un material ceden su energía en forma de calor.

Las ondas más energéticas son aquellas de mayor frecuencia (ν) o lo que es lo mismo de poca longitud de onda (λ). Como demuestra la expresión de la energía de un fotón:

$$E = h \cdot \nu \text{ (siendo } h \text{ la constante de Planck de valor } 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js.)}$$

y la velocidad de un fotón se entiende como:

$$C = \lambda \cdot \nu \text{ siendo } \nu = C / \lambda$$

sustituyendo para la expresión de la energía:

$$E = h \cdot (C / \lambda)$$

Como consecuencia de este fenómeno, dos cuerpos colocados en el vacío que están a diferentes temperaturas alcanzan el equilibrio térmico debido a que el de menor temperatura recibe energía radiante del otro cuerpo de mayor temperatura. Cuando la energía radiante es absorbida por un cuerpo, se transforma en calor; no obstante la energía radiante también puede ser reflejada (difundida) o refractada (propagada) por los cuerpos. Trataremos únicamente la energía radiante emitida por los sólidos y los líquidos, pues la emitida por los gases obedece a leyes muy diferentes.

La energía radiante es emitida por toda la materia del cuerpo, pero en general, en su interior la energía emitida por cada punto es nuevamente absorbida, por eso solamente se libera la energía correspondiente a una delgada capa de la superficie del cuerpo. No solo depende de la temperatura de la superficie sino también de su naturaleza.

Cuando la radiación solar incide sobre un material suceden varios fenómenos:

Reflexión. Una parte de esta radiación es reflejada instantáneamente, de manera que no atraviesa el vidrio ni lo calienta. El cálculo del mismo se realiza mediante el “albedo”, que es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma y se expresa en tanto por ciento.

$$\text{Albedo (\%)} = \text{Radiación reflejada} / \text{Radiación incidente}$$

Del mismo modo, podríamos usar esta relación en términos caloríficos, obteniendo:

$$Q \text{ reflejado} = \text{Albedo} \times Q \text{ incidente}$$

Absorción. Otra parte de la radiación solar penetra el vidrio pero es absorbida internamente, propiciando su calentamiento. La capacidad de absorción de energía de un cuerpo es la misma que la capacidad de emisión, Para abordar el cálculo de la energía absorbida por un cuerpo, antes hay que definir el concepto de cuerpo negro, que se entiende como la superficie idealizada que emite radiación a la potencia máxima.

La radiación del cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica. Para su cálculo, se ha de hacer uso de la Ley de Stefan Boltzmann, que establece que la cantidad total de calor emitida o absorbida por un cuerpo (en todas las longitudes de onda), por unidad de tiempo y para una determinada superficie (A_s), es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Esta ley se puede expresar matemáticamente:

$$Q \text{ emitida,max (W)} = \sigma \cdot A_s \cdot T^4$$

Donde σ es la constante de Stefan Boltzmann, de valor $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$ y relaciona temperatura absoluta y energía.

La radiación emitida por las superficies reales es siempre menor que la que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. Para cuantificar la radiación emitida por una superficie real respecto a la

que emitiría el cuerpo negro se utiliza la emisividad, es decir, la emisividad representa la radiación emitida por una superficie respecto a la que emitiría el cuerpo negro:

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiación emitida por una superficie determinada}}{\text{Radiación emitida por un cuerpo negro}}$$

El rango de valores de la emisividad está comprendido en el intervalo: $0 < \varepsilon < 1$. Para el cuerpo negro $\varepsilon = 1$

Ahora, la radiación emitida por una superficie real se expresa es una porción de la que emitiría el cuerpo negro. Esa porción viene dada por la emisividad. La radiación emitida por una superficie real se expresa, tal y como ya se explicará para un cuerpo negro, como:

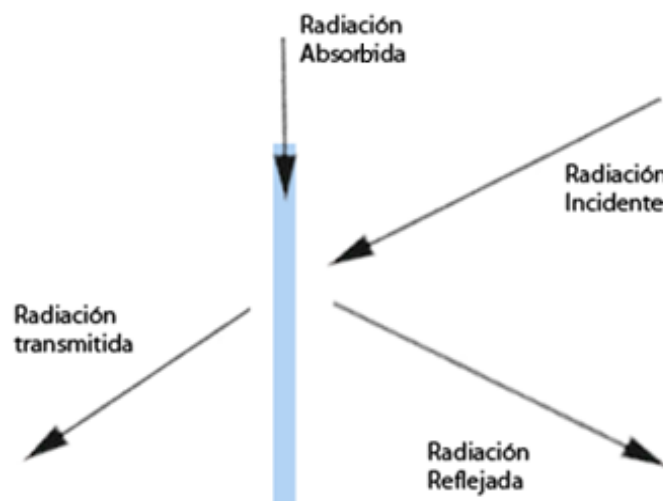
$$Q_{\text{emitida}} (W) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T^4$$

Transmisión. Finalmente, la parte de la radiación que no es reflejada ni absorbida atraviesa el vidrio y es transmitida directamente al interior, en distinta proporción dependiendo de su coeficiente de transmitancia.

La transmitancia se define como la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en determinada cantidad de tiempo, es decir, en nuestro caso, la energía que atraviesa el vidrio, partido por energía incidente sobre el mismo. (Este índice siempre se moverá entre valores de 0 y 1)

$$\tau (\%) = Q_{\text{transmitida}} / Q_{\text{incidente}}$$

De modo que la energía total incidente sobre una superficie, se reparte del siguiente modo:



$$Q_{\text{incidente}} = Q_{\text{absorbido}} + Q_{\text{reflejado}} + Q_{\text{transmitido}}$$

Es importante señalar que en realidad los procesos descritos arriba resultan un poco más complejos, por lo motivos que se exponen a continuación:

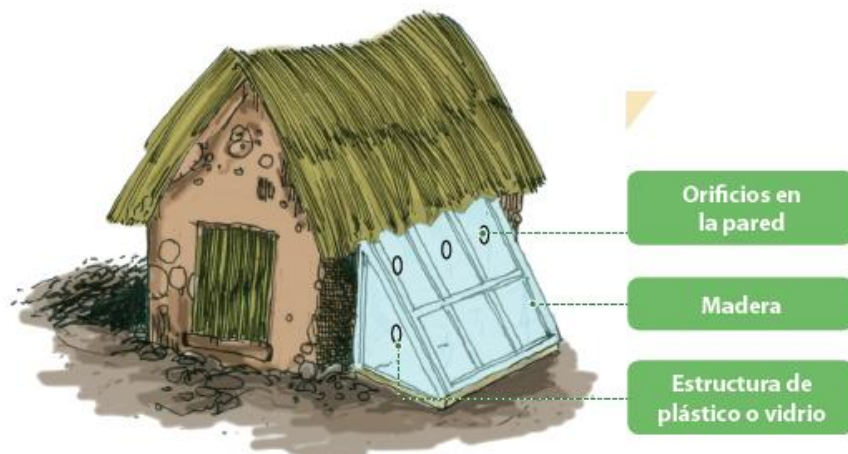
- La radiación solar no solo es reflejada por la superficie exterior del vidrio. La superficie interior también refleja una parte de la radiación que logra atravesarlo (aquella que no ha sido reflejada por la superficie exterior ni absorbida), dando lugar a una serie de inter-reflexiones. En cada proceso de inter-reflexión una parte de la radiación es absorbida.
- La energía térmica generada por los procesos de absorción no permanece en el vidrio, sino que posteriormente es re-irradiada como radiación de onda larga. Este proceso se da en ambas direcciones, es decir hacia el exterior y el interior, con una proporción que dependerá de las características específicas del vidrio.

- Como sabemos, la radiación solar que llega a la superficie terrestre está conformada por diversos rangos del espectro electromagnético. Y los materiales suelen responder de distinta manera a cada uno de esos rangos. Por ejemplo, si son más o menos transparentes a buena parte de las longitudes de onda de la porción ultravioleta y a toda la porción visible. También lo son a los infrarrojos cercanos, característicos de objetos con temperatura muy elevada. En cambio son opacos a los infrarrojos lejanos, característicos de objetos a temperaturas terrestres. Esto último genera lo que se conoce como efecto invernadero.

Conocido el proceso de transmisión de calor por radiación solar, podemos entender el funcionamiento de un Muro Trombe.

4.3 Tecnología Muro Trombe

La tecnología que nos ocupa, consiste muy a grandes rasgos, en un muro orientado al sol, construido con materiales que le puedan dotar de una gran inercia térmica (piedra, hormigón, adobe...), combinado con un colchón de aire, encerrado por una superficie transparente que permita penetrar a la radiación solar.



Casa con Muro Trombe, Manual Kōñiwasi

La radiación procedente del sol, incide sobre la superficie transparente de nuestra instalación, una parte de ella directamente es reflejada y otra que es transmitida (la radiación absorbida por la superficie transparente se considera despreciable para el rango de espesores a utilizar).

Como ya se ha explicado, la radiación solar, emite en una amplia gama de longitudes de onda, nuestro material transparente será permeable solo a algunas, las de longitud de onda corta, que son las de mayor valor energético. Estas incidirán contra la superficie del muro, que absorberá gran parte de la energía que contienen, parte de esta energía absorbida, será emitida como radiación a la habitación que se pretende calentar a través de la masa térmica, y otra parte se reflejará hacia nuestra superficie transparente de nuevo, pero con otra longitud de onda diferente, ya que la temperatura del muro es muy inferior a la del astro, así que será una longitud de onda más larga, a la que nuestro material es menos permeable. Se podría interpretar como una especie de trampa en la que almacena la energía de la radiación solar.

A partir de aquí, los fenómenos que permiten la transmisión de calor al interior de la vivienda son:

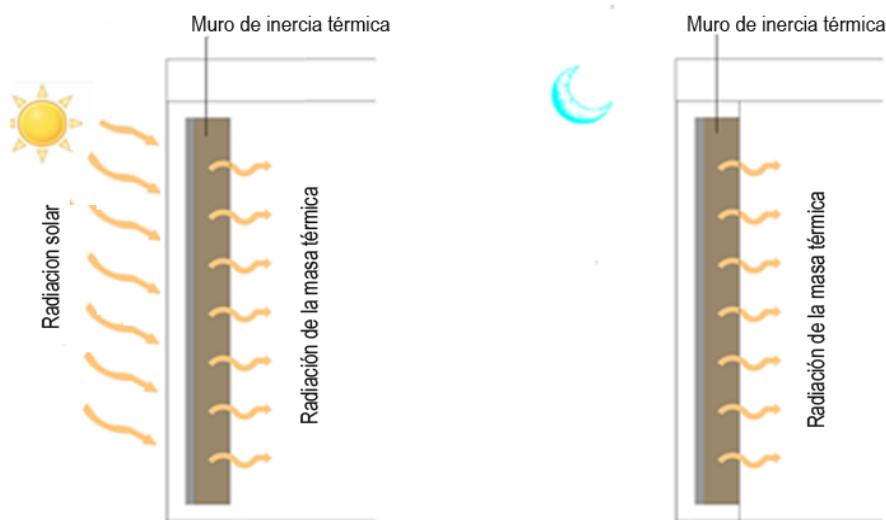
- El efecto termosifón producido por el calentamiento del aire encerrado entre la superficie transparente y el muro de la vivienda.
- La aportación de calor gracias al muro de gran inercia térmica.

4.3.1 Importancia de la Inercia Térmica

La inercia térmica es la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura. Ésta tiene una vinculación directa con la acumulación de energía, los edificios con mucha inercia acumulan una gran cantidad de energía. La capacidad de almacenar energía de un material depende fundamentalmente de su masa, su densidad y su calor específico.

Se puede decir que el modo bioclimático de acumulación de energía más óptimo, es la utilización de la propia inercia térmica del edificio. Los materiales constructivos con mayor masa, ya sea debida a su volumen o a su densidad, son los que confieren a los edificios del que forman parte, mayor inercia térmica. Los valores altos de la misma permiten conseguir uno de los objetivos más deseables en un edificio, la estabilidad térmica, es decir, la temperatura fluctúa levemente y no se debe consumir excesiva energía para su mantenimiento.

La inercia térmica permite el confort en el interior del edificio cuando hay periodos con cambios bruscos de las temperaturas exteriores o del soleamiento, a los cuales los sistemas de calefacción activos no pueden responder si la instalación no lleva la regulación oportuna. Gracias a la masa térmica de un edificio, se capta la radiación directamente del sol, acumulando el calor para liberarlo por radiación durante 8 o 12 horas (coincidiendo aproximadamente con el periodo nocturno), depende de la estación del año y la localización. A mayor inercia térmica, menos variarán las temperaturas en el interior del edificio en cuestión.



Proceso de transmisión de calor por radiación del muro de inercia térmica.

Los materiales ideales para constituir una buena masa térmica, y por tanto inercia térmica, son aquellos que tienen un elevado calor específico, alta densidad y baja conductividad térmica. Algunos mejores materiales para conseguir este efecto son; la tierra, el barro, rocas naturales, hormigón, agua...

Generalmente se utilizan materiales de gran densidad, espesor de 25-40 cm, cara exterior de color oscuro para absorber más radiación y orientación adecuada para la mayor captación de radiación solar, en función de las características de cada emplazamiento.

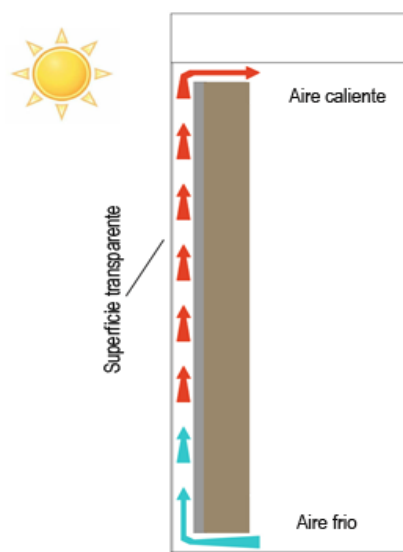
El muro destinado a masa térmica debe tener un grosor apropiado, de modo que el interior del edificio siga siendo fresco durante el día y el calor se transfiera al interior durante la noche. Si el muro es demasiado fino, penetrará el calor en el interior de la vivienda durante el día, justo cuando no se necesita, y no quedará suficiente calor almacenado en la masa para soltarlo durante la tarde o noche, que es cuando más frío hace. Si la pared es demasiado gruesa, puede costarle bastante acumular el calor y empezar a liberarlo en un momento del día en que no se necesite.

Estos materiales pesados tienen la cualidad de absorber la energía calórica y distribuirla gradualmente en su estructura interna. Dado que requieren una gran cantidad de energía para aumentar su temperatura, los procesos de transmisión de calor por conducción a través de ellos propician un efecto de “almacenamiento”.

4.3.2 Efecto termosifón

Quizás una de las aplicaciones más conocidas donde se produce este fenómeno, es en los sistemas solares pasivos de calentamiento de agua (colectores solares), pero vamos a explicar el caso que nos atañe, es decir, el calentamiento de aire para conseguir mediante circulación natural, aumentar la temperatura de una estancia.

La superficie transparente, permite que pase la radiación solar al interior, calentando el volumen de aire encerrado y dificultando la pérdida de calor a través del mismo, en función de su emisividad, transmitancia y albedo, tal y como se ha explicado en el apartado anterior. Este aire caliente, por tener una densidad menor, tiende a acumularse en la parte superior, mientras el frío se localiza en la capa inferior. El calentamiento del aire del interior del invernadero, crea una desigualdad de temperaturas entre este y el ambiente de la vivienda, la cual provoca la circulación natural del mismo entre las dos estancias, a través de unos agujeros realizados en el muro, esto es lo que se conoce como el fenómeno del “termosifón”. El aire calentado por la radiación solar se introduce en la habitación por los agujeros superiores, mientras que el aire frío del interior de la casa sale al invernadero por los inferiores, para ser calentado y regresar de nuevo a la vivienda con una temperatura superior.



Efecto termosifón en el calefactor solar

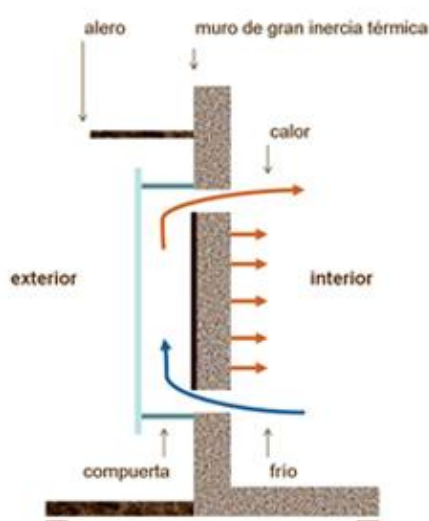
Este sistema que por el día y bajo la acción del sol, permite calentar una estancia, realiza por la noche el proceso contrario, es decir, el enfriamiento de la misma, si no se toman las medidas adecuadas. Estas consisten en el taponamiento de los agujeros poco después del anochecer, a fin de bloquear la entrada de aire frío al dormitorio.

5 Diseños

A continuación se detallan las características de algunos de los modelos existentes, teniendo siempre en cuenta, que estudio está enmarcado dentro de un proyecto de cooperación al desarrollo, donde el presupuesto y el acceso a los materiales, principalmente, van a impedir la posibilidad de siquiera estudiar sistemas más complejos.

Los presupuestos de cada modelo, se realizan en relación a los precios existentes en la ciudad de Cajamarca y expresados en Soles Peruanos.

5.1 Vertical



Ventajas

- Poco impacto directo de lluvia.
- Se encuentra bien protegido
- Facilidad en el flujo de calor.
- Es adaptable a casi todas las viviendas y entornos, ya que ocupa poco espacio.
- Poca necesidad de impermeabilización...
- El mantenimiento y la limpieza son simples y accesibles.

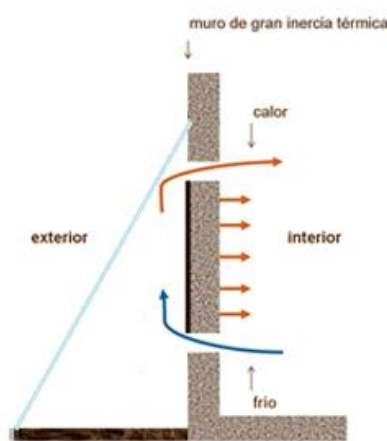
Inconvenientes

- Poco ángulo para la captación de la radiación solar en Perú, son ineficientes debido a la inclinación del sol para esta localización.
- Dificultad de montaje.
- Dificultad en el transporte.
- Caro.
- Es una tecnología replicable, pero es más difícil el acceso al cristal.
- Las reparaciones son complejas, y más costosas.

Materiales y Presupuesto

Nº unidades	Materiales	Precio Unidad (S./)	Precio Global (S./)
10	Yeso en saco (10kg)	3,5	35
1	Clavo 4" (1kg)	5	5
1	Cola blanca (1Galón)	19,5	19,5
1	Aceite de linaza (1Litro)	24,4	24,4
36	Tornillo p/ aglomerado 6x120	0,32	11,52
1	Pintura látex negro (1Galón)	21	21
6	Madera de eucalipto (1,5m x 0,3m x 2")	22	132
2	Madera de eucalipto (3m x 0,3m x 2")	44	88
1	Jebe (10 cámaras de bicicleta)	6	6
1	Tubo silicona (1Litro)	20	20
1	Vidrio templado incoloro (3m x 1,5m)	585,13	585,13
Total:			947,55 S/.

5.2 Inclinado



Ventajas

- Angulo óptimo de captación para la localización.
- La presencia de piedras en la base ayudan a acumular más calor.
- Construcción sencilla.
- Económico
- Transporte de materiales sencillo y seguro.
- Debido a su sencillez, es fácilmente replicable por los beneficiarios de las comunidades.
- Su reparación resulta sencilla y accesible.

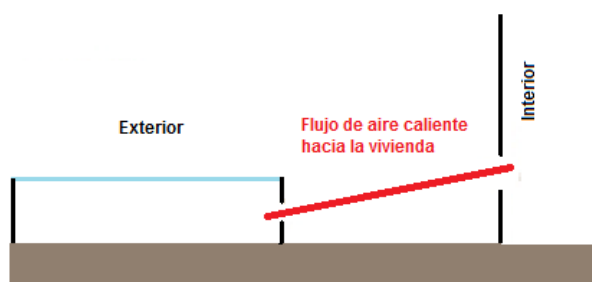
Inconvenientes

- Está a ras del suelo; más fácil de dañar y se ensucia con mayor facilidad.
- Recibe más impacto de la lluvia; mas suciedad y precisa de mayor impermeabilidad.
- Puede recibir humedad de la propia tierra.
- El hecho de que ocupe más espacio, puede suponer un problema en determinadas viviendas con obstáculos en su entorno (montículos, árboles, cobertizos...).

Materiales y Presupuesto

Nº unidades	Materiales	Precio Unidad (S./)	Precio Global (S./)
10	Yeso en saco (10kg)	3,5	35
1	Clavo 4" (1kg)	5	5
1	Cola Blanca (1Galón)	19,5	19,5
1	Aceite de Linaza (1Litro)	24,4	24,4
36	Tornillo p/ aglomerado 6x120	0,32	11,52
1	Látex Negro (1Galón)	21	21
9	Listones de secos(3"x3"x2,5m)	16,22	145,98
3	Listones de (3"x3"x1,5m)	11	33
3	Listones de (3"x3"x1,85m)	11	33
3	Listones de (2"x2"x2m)	6	18
4	Listones de (2"x2"x2,5m)	8	32
7	Tapajuntas (2,5m)	4	28
1	Jebe (10 cámaras de bicicleta)	6	6
1	Saco de Cal (50kg)	30	30
0,5	Clavos de 1/2" (1kg)	6	3
1	Velcro (3m)	7	7
1	Plástico de Invernadero (3x10)	130	130
Total:			582,4 S/.

5.3 Horizontal



Ventajas

- Ángulo muy óptimo de captación de la radiación solar.
- No precisa, apenas, de obra en la vivienda (agujeros, anclajes).
- Podría aprovecharse para más de una casa (aunque el Trombe tendría que ser mayor)

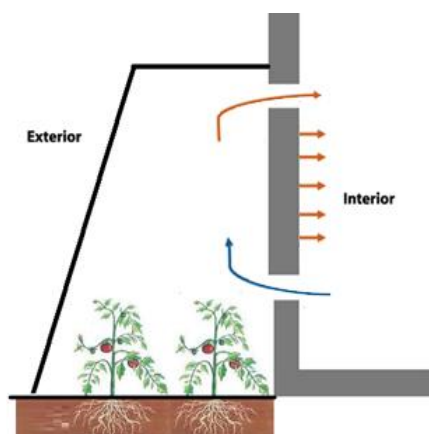
Inconvenientes

- Al no estar adherido a la vivienda, no calienta ningún muro de la misma, no hay inercia térmica.
- Necesita estar en ubicaciones muy abiertas, para optimizar la captación de radiación.
- Está expuesto por completo a la acción de la lluvia; suciedad, deterioro y más mantenimiento.
- Necesita una gran labor de impermeabilización.
- Puede entrar humedad de la propia tierra.
- Al estar completamente en el suelo y no adherido a la pared, es más propenso a dañarse.
- Dificultad en el flujo de aire frío y caliente.
- Más complicado ubicarlo de forma que no altere el tránsito de personas o animales, o varíe las actividades de los beneficiarios.

Materiales y Presupuesto

Nº unidades	Materiales	Precio Unidad (S./)	Precio Global (S./)
10	Yeso en saco (10kg)	3,5	35
1	Clavo 4" (1kg)	5	5
1	Cola blanca (1Galón)	19,5	19,5
1	Aceite de linaza (1Litro)	24,4	24,4
40	Tornillo p/ aglomerado (6x120)	0,32	12,8
36	Adobe (40cm x 20cm)	0	0
2	Madera de eucalipto (2,5m x 0,4m x 2")	40	80
2	Madera de eucalipto (1,5m x 0,4m x 2")	25	50
7	Listones de 3"x3"x1,5m	11	77
7	Tapajuntas de 1,5m	2,5	17,5
1	Plástico negro (2,5m x 1,5m)	16,13	16,13
1	Jebe (10 cámaras de bicicleta)	6	6
1	Tubería PVC 11cm Ø (3m)	60	60
1	Plástico de Invernadero (3x8)	130	130
Total:			533,33 S/.

5.4 Invernadero



Ventajas

- Tiene superficies de captación a dos inclinaciones distintas, 70 y 10 grados aproximadamente, que son óptimas para la latitud.
- Mucha superficie para poner piedras que acumulan calor u otros elementos de gran inercia térmica.
- Espacio habilitado para el cultivo.
- Económico
- Replicable. Aunque reporta una mayor complejidad que el modelo inclinado.

Inconvenientes

- La humedad del propio cultivo, pasa a la circulación del aire y por lo tanto afecta al interior de la vivienda.
- Durante la noche, las plantas producen CO₂, que se podría incorporar al interior de la vivienda, con su correspondiente peligro.
- Recibe más impacto de la lluvia; precisa de mayor impermeabilización.
- Difícil limpieza.
- Difícil acceso para la limpieza y el mantenimiento a la parte superior de la estructura (riesgo de dañarlo).
- Con la entrada y salida al invernadero, para las labores de agricultura en el interior, se perdería parte del calor acumulado, disminuyendo el rendimiento.

Materiales y Presupuesto

Nº unidades	Materiales	Precio Unidad (S./)	Precio Global (S./)
10	Yeso en saco 10kg	3,5	35
1,5	Clavo 4" (1kg)	5	7,5
1	Cola Blanca 1Galón	19,5	19,5
2	Aceite de Linaza (1Litro)	24,4	48,8
50	Tornillo p/ aglomerado 6x120	0,32	16
1	Látex Negro 1 Galón	21	21
9	Listones de (3"x3"x2,5m)	16,22	145,98
6	Listones de (3"x3"x1,5m)	11	66
3	Listones de (3"x3"x1,85m)	11	33
3	Listones de (2"x2"x2m)	6	18
8	Listones de (2"x2"x2,5m)	8	64
14	Tapajuntas (2,5m)	4	56
1	Jebe (20 cámaras de bicicleta)	12	12
1	Saco de (50kg de Cal)	30	30
0,5	Clavos de 1/2" (1kg)	6	3
1	Velcro		0
1	Plástico de Invernadero (3x15)	195	195
Total:			770,78

5.5 Latas



Ventajas

- Económico y sencillo.
- Materiales reciclados.
- Portátil en función de la orientación del sol. (Incluso se podría retirar para evitar el deterioro por granizadas o fuertes vientos)
- Fácil mantenimiento y limpieza.

Inconvenientes

- Pueden oxidarse con facilidad si entra agua al sistema, precisa de una buena impermeabilización.
- Las latas se deterioran fácil con la acción de la radiación solar.
- Poco compacto, frágil. Además, al no estar anclado, más fácil que vuelque o se deteriore.
- Poca eficiencia.
- Al no estar pegado al muro, no tiene inercia térmica con la que aportar calor a la vivienda.

Materiales y Presupuesto

nº Unidades	Materiales	Precio Unidad (S./)	Precio Global (S./)
1	Clavo 4" (0.5kg)	5	2,5
1	Cola blanca (1Galón)	19,5	19,5
1	Aceite de linaza (1Litro)	24,4	24,4
40	Tornillo p/ aglomerado 6x120	0,32	12,8
2	Madera de eucalipto (2,5m x 0,4m x 2")	40	80
2	Madera de eucalipto (1,5m x 0,4m x 2")	25	50
7	Listones de (3"x3"x1,5m)	11	77
7	Tapajuntas (1,5m)	2,5	17,5
1	Jebe (10 cámaras de bicicleta)	6	6
1	Tubería PVC 11cm Ø (3m)	60	60
x	Latas refresco	0	0
1	Vidrio templado incoloro (1,5m x 2m)	390	390
Total:			739,7

5.6 Alambres y piedras



Ventajas

- Gran inercia térmica.
- Muy poco mantenimiento.
- Económico.
- Materiales locales.
- Fácil reparación
- Replicable

Inconvenientes

- No hay mucha información sobre el rendimiento.
- Ocupa mucho espacio en el interior de la vivienda, dadas las dimensiones de las casas donde se pretende establecer el sistema, tenemos que desechar la posibilidad de aplicar este modelo.
- Las casas de las comunidades de destino de este proyecto, son de adobe y con ventanas pequeñas para disminuir las pérdidas de calor en el interior de la vivienda. Por lo tanto, no es aplicable este modelo, ya que no puede recibir a radiación solar necesaria.

Materiales y Presupuesto

Nº unidades	Materiales	Precio Unidad (S./)	Precio Global (S./)
1	Aceite de linaza (1Litro)	24,4	24,4
40	Tornillo p/ aglomerado (6x120)	0,32	12,8
1	Látex Negro 1 Galón	21	21
1	Malla metal (2m x 4 m)	20	20
1	Alambre Rollo (10 metros)	9	9
0	Piedra	0	0
8	Listones de (3"x3"x2,5m)	11	88
Total:			175,2

6 Análisis comparativo

Con el objetivo de esclarecer cuales son las ventajas de los diferentes modelos, así como de los materiales con los que se fabrican, se he realizado una comparación básica de las distintas opciones.

6.1 Vidrio y plástico

Prácticamente todos los modelos anteriormente expuestos, podrían ser instalarse con plástico transparente y con vidrio (además de otros materiales que por su alto coste, ni siquiera serán estudiados). Establecer una comparación entre todas las variantes de plásticos y vidrios útiles para este fin, sería muy laborioso, y no por ello mucho más clarificante, dado que estamos hablando de la implementación de nuestro sistema dentro de un programa de cooperación al desarrollo, en un país y una región donde la escasa oferta y accesibilidad a determinados materiales limita mucho el rango de búsqueda. De modo que se ha realizado un estudio comparativo de Agrofilm (plástico usado en los invernaderos de la zona), vidrio y vidrio templado.

En primer lugar hemos comprado las características mecánicas y sociales que más nos interesaban para la función a desempeñar de estos materiales, en el siguiente cuadro:

	Plástico	Vidrio	Vidrio Templado
Dureza	Fácil de rayar, pierde transparencia y rendimiento.	De 350 a 550 kg/cm ²	Mucha mayor resistencia a la rotura que un vidrio no templado 1.850 a 2.100 kg/cm ²
Resistencia a la rotura	Aguanta bien los impactos de objetos no punzantes	Poca resistencia al impacto	Resiste ordenes de magnitud 4 o 5 veces superiores al vidrio convencional
Resistencia a la flexión	No hay riesgo de rotura por flexión	400 daN/cm ²	Son 4 ó 5 veces más resistentes a la flexión que los productos recocidos.
Resistencia a las contracciones térmicas	No hay riesgo de rotura por contracción térmica	Son frágiles a este tipo de fenómenos. Soporta diferencias de aproximadamente 18°C	Mayor que el vidrio convencional, soporta diferencias de hasta 25° C
Resistencia a la corrosión, acción del sol (vida útil)	Poca vida útil bajo la acción del sol (2 años)	Gran resistencia a estos agentes	Gran resistencia a estos agentes
Seguridad	No supone ningún peligro a considerar.	En caso de accidente puede ocasionar cortes profundos.	En caso de rotura accidental, el vidrio templado se fragmenta en pequeños trozos, no pudiendo causar cortes profundos.
Complejidad del transporte	Muy Simple	Muy complejo, es muy frágil para realizar según que trayectos. Ocupa mucho espacio, vehículos especiales, mucho coste.	Puede soportar mejor el trayecto sin romperse, pero sigue teniendo los mismos problemas para su transporte.
Reparaciones	Sustitución y reparación fácil y económica	Costosa y compleja.	Muy costosa y compleja.
Limpieza	Sencilla, pero captura el polvo con facilidad, por la electricidad estática.	Sencilla, pero podría resultar peligrosa, depende del modelo.	Sencilla y menos peligrosa que el vidrio convencional.
Accesibilidad	Material local, barato	Material local, caro	Material local muy caro

También hemos comparado las características térmicas y ópticas de los materiales, igual que ocurre con las propiedades mecánicas, podríamos haber recogido un gran número de ellas, pero nos centraremos en las que más nos interesan.

En cuanto a las cualidades ópticas, nos interesa sobre todo la transmitancia, ya que la absorptividad de estos materiales, para los espesores utilizados, es muy baja. También tiene interés la opacidad radiación de onda larga, ya que altos valores de esta magnitud, nos permitirán atrapar mayor la radiación solar en interior de nuestro sistema, y por lo tanto conseguir un mayor rendimiento.

De las propiedades térmicas, nos interesa especialmente la conductividad, ya que valores bajos de esta cualidad, permitirán reducir las pérdidas por radiación y convección.

	Plástico	Vidrio	Vidrio Templado
Transmitancia onda corta	Media	Alta	Alta
Opacidad radiación de onda larga	Media	Baja	Baja
Conductividad	0.1-0.5 (W/mK)	0.8 (W/mK)	0.8 (W/mK)

Por último una comparación del coste, según los precios de la zona, expresados en soles peruanos. Aunque ya se ha tenido en cuenta dentro de los factores sociales, este factor es por desgracia el de mayor importancia, ya que por muy bueno que fuese un material para el trabajo a realizar, un precio alto lo haría prohibitivo, ya que se trata de un proyecto de cooperación al desarrollo, con un presupuesto generalmente muy ajustado.

	Tipo	Grosor (mm)	Precio (sol/ft ²)
Vidrio	Incoloro	6	3.6
		8	5.5
	Templado	6	12.08
Plástico	Agrofilm		0.21

6.2 Comparación cualitativa de modelos artesanos

	Coste	Complejidad Transporte y Montaje	Mantenimiento Y Limpieza	Fabricación Local	Angulo incidencia	Radiación captada (KWh/ m ² d)
Vertical	Medio	Media	Baja	Alta	90°	2.7
Inclinado	Medio	Media	Media	Alta	60°-70°	4.2 – 3,7
Horizontal	Medio	Alta	Alta	Alta	0°	5,6
Invernadero	Alto	Alta	Alta	Media	10° y 70°	5,68 y 3,7
Piedras y Alambre	Muy bajo	Baja	Baja	Alta	90°	2.7
Latas	Muy bajo	Baja	Baja	Alta	Regulable	Regulable

Por último hemos querido saber como influyen las inclinaciones de los diferentes modelos, en la captación de la radiación solar con el programa Meteonorm, obteniendo los siguientes resultados.

Angulo de inclinación (Grados °)	Radiación (KWh / m ² d)
0	5,6
10	5,68
20	5,62
30	5,4
40	5,1
50	4,75
60	4,2
70	3,7
80	3,1
90	2,7



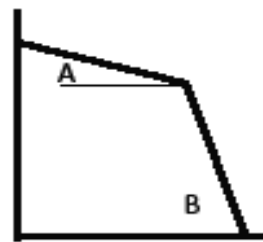
MT Vertical
MT Piedras
90 °



MT Inclinado
MT Latas
40°-80°



MT Horizontal
90°



MT Invernadero
A = 10° - 30°
B = 40° - 80°

7 Elección

El proceso de elección de la tecnología adecuada lo vamos a presentar en 2 partes; la elección del modelo adecuado y la del material de la superficie de captación.

7.1 Elección del modelo apropiado

A partir de la información aportada en cada uno de los modelos, y de las anteriores tablas y gráficos comparativos, podemos realizar descartes entre los diferentes modelos, hasta quedarnos con la opción más adecuada, para nuestras condiciones de trabajo e instalación;

- Podríamos eliminar el modelo vertical atendiendo al bajo rendimiento que se le supone. No tiene mucho sentido instalar un colector solar con 90 ° de inclinación en Cajamarca, Perú, un lugar donde el sol irradia con 83° de inclinación, es decir, casi vertical. Esto provocaría que el sistema casi no recibiera radiación directa, haciendo su rendimiento muy bajo.

A esto hay que sumarle, que la mayoría de las casa de la comunidad cuentan con aleros que dificultan aún más la captación para estos sistemas.

- El modelo horizontal queda descartado por su bajo rendimiento, debido a que aunque su inclinación sea la más óptima, al no estar adherida a la vivienda, el aporte realizado por la inercia térmica conseguida no aumenta en relación a la vivienda antes de la intervención. Hay que recordar que el efecto producido por la existencia de una importante masa térmica, es decisivo para evitar las grandes fluctuaciones de temperatura en el interior de la vivienda.

Además al estar el sistema a ras de suelo, puede ser dañado con mayor facilidad, necesita más labores de limpieza y mantenimiento, y puede ser un estorbo para las labores rutinarias de los beneficiarios.

- A la hora de valorar los problemas y beneficios de la instalación del modelo Invernadero, nos encontramos con que cumple ampliamente con la mayoría de los requisitos técnicos, como; óptimos ángulos de inclinación, presupuesto adecuado al proyecto, su montaje puede ser asumido por la comunidad, tiene un colchón de aire suficiente y es fácilmente reparable.

La decisión de descartar este sistema, viene cimentada en dos aspectos fundamentales:

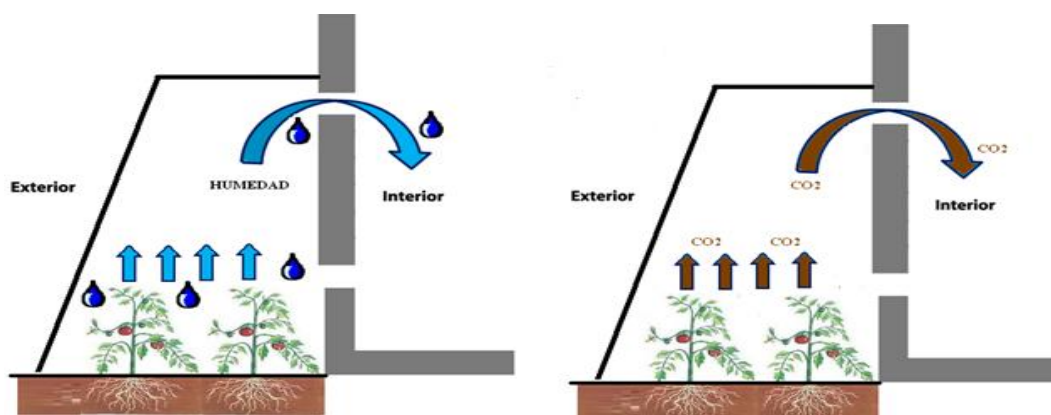
- El problema con los espacios en el entorno de las viviendas. Generalmente las viviendas destino de estos sistemas, cuentan con poco espacio útil en sus alrededores, ya que suelen encontrarse elementos naturales o constructivos a su alrededor. También nos encontramos con que algunos de esos espacios son utilizados para la realización de labores del hogar, transito de animales u otros quehaceres. De modo que instalar el modelo invernadero, que precisa de mucho espacio, resulta en la mayoría de los casos bastante complicado.
- Sin ser características eliminatorias, el precio y la complejidad del montaje también influyen en nuestra elección. Se calcula que cuesta unos 200 soles más que el modelo inclinado, que equivaldría a un tercio del sueldo medio mensual de la comunidad. En cuanto a la complejidad, realizar estos modelos a dos aguas, precisa de mayor cuidado en el diseño y el montaje.

Otros dos factores que se deberían tener en cuenta a la hora de juzgar el modelo de Invernadero-Trombe son la “humedad” y la “toxicidad”, por las siguientes razones:

- *Humedad*: los cultivos encerrados en el calefactor, precisan de riego, que crea humedad en el interior del muro Trombe, la cual se incorpora al ambiente de la

vivienda en el ciclo de circulación del aire. Este hecho como es lógico es puede ser altamente perjudicial para las personas residentes.

- *Toxicidad*: el proceso antagónico a la fotosíntesis que realizan las plantas por la noche, consiste en absorber oxígeno y expulsar dióxido de carbono, el cual, del mismo modo que la humedad, entraría en la vivienda. Aunque los orificios deberían ser tapados durante gran parte de la noche y CO₂ producido no debería ser un problema, puede ser importante tener en cuenta este factor.



Por último, la constante apertura de la puerta para las labores de mantenimiento de los cultivos del interior del invernadero con la consecuente ventilación que ello supone, disminuirían notablemente el rendimiento del nuestro calefactor.

- El modelo de latas, como ya se ha explicado en el modelo horizontal, no incluye un aumento de la inercia térmica de la vivienda, al no estar adherido a la misma. Además la escasa resistencia a del material a la radiación y la menor accesibilidad a los materiales que en otros modelos, aconsejan no elegir este modelo.
- El *modelo de Piedras y Alambre* ocupa mucho espacio en el interior de la vivienda, dadas las dimensiones de las casas donde se pretende establecer el sistema parece poco apropiado. Generalmente las ventanas pequeñas para disminuir las pérdidas de calor en el interior de la vivienda, dado que este sistema precisa de una gran superficie que permita pasar la radiación al interior de la vivienda, es inviable su aplicación.

En consideración con todos los motivos antes expuestos, se ha elegido el *modelo inclinado* para su instalación en la comunidad de Pucara, Cajamarca, Perú. Es económico, sencillo, replicable y reparable, con una inclinación óptima, transportable, seguro, ocupa poco espacio útil.

7.2 Elección del material de la superficie de captación

Aunque el vidrio tenga mejores cualidades mecánicas y ópticas que el plástico de invernadero, el vidrio debe ser eliminado de la elección por los siguientes motivos:

- Su *complejidad* en el montaje y en el transporte a zonas poco accesibles (como ocurre en nuestro proyecto).
- Por *seguridad*, ya que estas instalaciones e hacen en zonas de transito frecuente de animales o personas, incluso zonas donde pueden jugar y correr niños. Aunque el vidrio templado no pueda producir cortes profundos, sigue siendo un factor importante de riesgo.

- Su *elevado coste*, el precio del vidrio templado puede ser hasta 60 veces mayor, lo que lo hace poco accesible y a su vez, poco replicable, mientras que el vidrio no templado no merece la pena siquiera ser valorado debido a su poquísima resistencia al impacto.

Así que se ha elegido construirlo con *Agrofilm*, plástico de invernadero de común comercialización en Cajamarca.

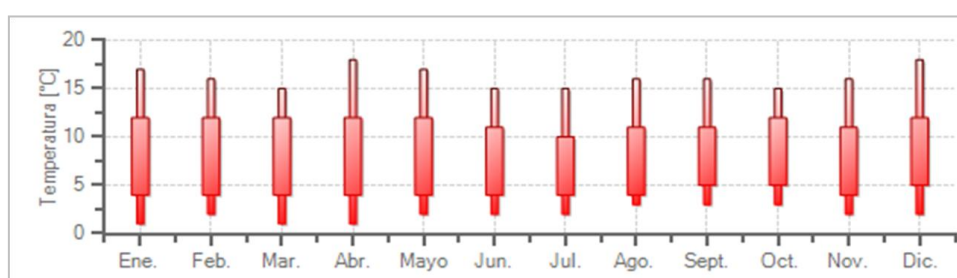
8 Estudio climatológico y territorial

Para el caso de Pucara, nuestra comunidad de destino, se ha recogido la siguiente información climática:

8.1 Intervalos de temperaturas ambientales

El conocimiento de las temperaturas mensuales del lugar donde se va a realizar la instalación, es muy importante para el futuro funcionamiento del Trombe, de modo que se pueda deducir como va a afectar el trabajo del muro en las diferentes épocas del año. Puede no ser determinante en lugares con cambios de temperaturas suaves, con climas constantes, donde el cierre y apertura de los agujeros para el control de la calefacción es siempre en horarios similares. Pero es muy importante para emplazamientos que sufran grandes variaciones térmicas de unas estaciones a otras, donde los hábitos de uso, han de variar entre estaciones, buscando evitar el sobrecalentamiento de la vivienda en los meses de más calor.

Como podemos observar, la zona de estudio, no tiene grandes cambios de temperatura de modo que no habrá mucha variación entre las horas de apertura y cierre de los agujeros del muro.

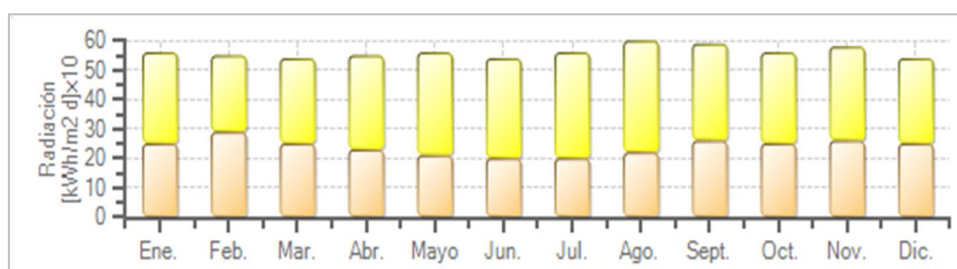


Variación de las temperaturas máximas y mínimas durante todo el año en el caserío de Granja Porcón, Cajamarca, Perú.

8.2 Radiación

La gráfica refleja las radiaciones máximas (en amarillo) y las mínimas (en naranja). Observamos que entre septiembre y febrero disponemos de buenas mínimas de radiación y altas máximas, mientras entre abril y agosto, tenemos mínimas bajas y máximas altas.

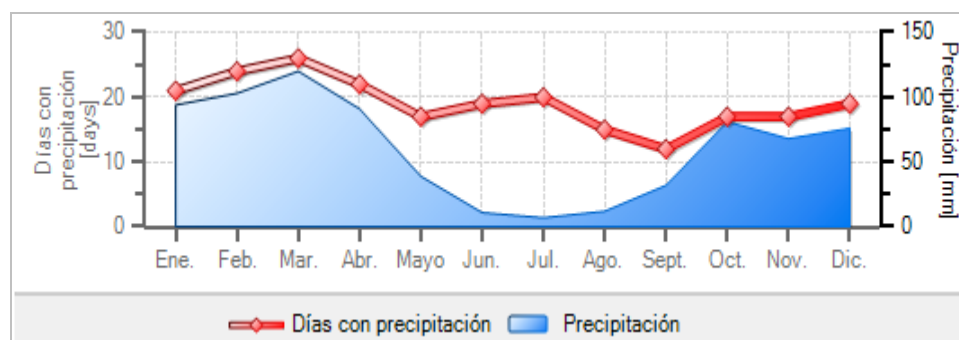
El estudio de este factor resultara fundamental para la evaluación de la evolución del rendimiento de nuestro calefactor, y para poder tomar medidas al respecto.



Desarrollo de radiaciones mínimas y máximas a lo largo del año. Granja Porcón, Cajamarca, Perú.

8.3 Precipitaciones

Las precipitaciones en la comunidad de Pucará tienen mayor intensidad entre los meses de Diciembre a Marzo. También se presentan fuertes heladas, sobre todo entre los meses de Junio a Noviembre, cuando se inicia el “verano”, llamado así por los pobladores de la zona debido al inicio de la temporada de estiaje.



Variación anual de las precipitaciones. Granja Porcón, Cajamarca, Perú.

El estudio de las precipitaciones de la zona en cuestión, se torna importante en el periodo de instalación de la tecnología. Es muy importante que su implementación se lleva a cabo en el periodo menos lluvioso que se disponga, ya que además de dificultar considerablemente la instalación, puede deteriorar el yeso o la madera.

Tal y como se puede apreciar en la gráfica, los mejores meses para la instalación del Muro Trombe, son de Mayo a Septiembre, ya que el resto de los meses sufren fuertes precipitaciones. De este modo la instalación de estas tecnologías fuera del plazo citado debe evitarse siempre que sea posible para optimizar el tiempo de instalación y el resultado del mismo.

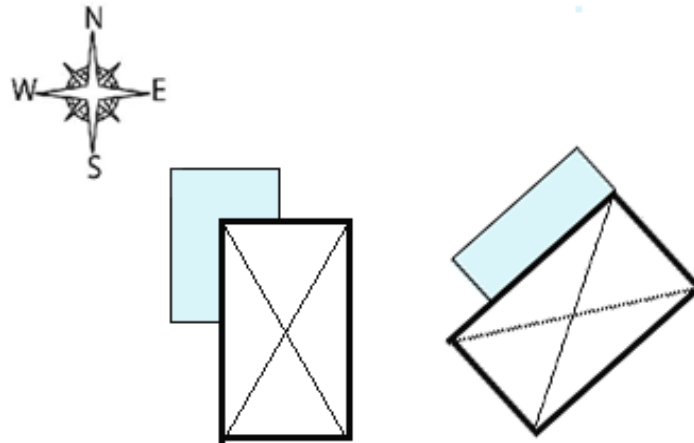
8.4 Viento

Es muy importante a la hora de diseñar, tener en cuenta las características del viento en la zona donde vamos a trabajar. De este modo, podemos analizar las características de los materiales necesarios para construir el Trombe, en función de los esfuerzos que deba soportar.

Los valores máximos para nuestra zona de aplicación, son de 75 km/h, según el mapa de vientos facilitado por el SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

8.5 Orientación

Sin duda uno de los factores más importantes para el buen funcionamiento del Muro Trombe, es la orientación. Debido a que estamos en el hemisferio sur, aunque muy cerca del ecuador, debemos buscar que nuestro muro, este orientado hacia el Norte o Nornoroeste, de este modo optimizaremos la captación de radiación solar al máximo.



En la ilustración podemos observar el modo de optimizar la captación solar, aprovechando la esquina, si las condiciones y la orientación lo permiten o por el contrario, de construcción lineal si tenemos el muro en condiciones ideales de orientación. Además hay que estudiar cual es la estancia que queremos calentar, normalmente, estos sistemas están orientados a su aplicación para dormitorios, ya que es donde mayor necesidad de calor se precisa (suelen ser poco habitadas durante el día), además que es donde más puede influir en la prevención contra enfermedades.

8.6 Sombreamientos

Hay que estudiar el entorno de la vivienda, así como los distintos elementos constructivos o naturales que puedan proyectar sombras sobre nuestro colector. Algunos ejemplos; Montañas o montículos, árboles, aleros, otras viviendas, otros elementos constructivos...

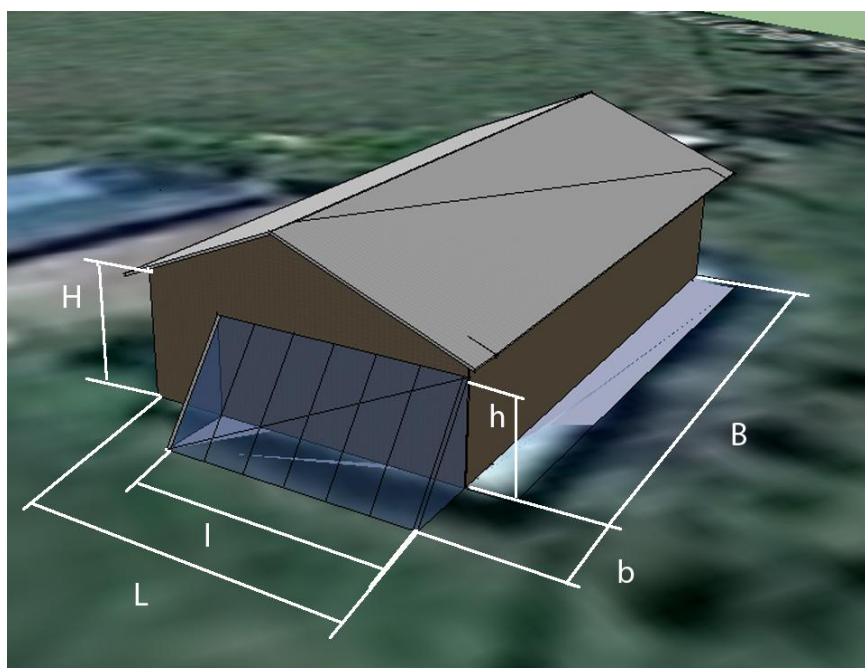
9 Dimensionado

9.1 Herramientas para el dimensionado

Para el cálculo de las dimensiones del Trombe, nos hemos apoyado en las investigaciones que ha realizado el Grupo de Apoyo al Sector Rural, de la Pontificia Universidad Católica de Lima, en base a la experiencia que desarrollan en numerosas comunidades altoandinas de Perú. Este material ha sido cedido desinteresadamente por dicho colectivo, que accedió a enseñarnos sus instalaciones y aclararnos cualquier duda durante la elaboración de este documento.

El dimensionado de nuestra tecnología, se ve también muy restringido por las características de las viviendas, el entorno y los hábitos que tienen lugar en el mismo. Las mayores limitaciones a la hora de dimensionar, las vamos a encontrar en tres aspectos:

- La altura de nuestro sistema (h), que vendrá limitada por la altura del muro elegido H para la instalación, así como de los aleros o elementos que puedan hacer sombra a la superficie de captación.
- La longitud de la pared elegida para la captación (l), también limitada por las características de la vivienda.
- La longitud de la base (b). Este parámetro, puede estar limitado por varios aspectos, como son la existencia de elevaciones o depresiones en el terreno, árboles u otros elementos constructivos, los hábitos de los beneficiarios o el tránsito de personas y/o animales.



Área horizontal de la habitación = $B \times L$

Área horizontal encerrada por el muro Trombe = $b \times l$

Área pared vertical de la pared = $H \times L$

Área pared vertical encerrada por el muro Trombe = $h \times l$

9.1.1 Área horizontal y vertical del muro:

Como podemos comprobar, la variabilidad de estas magnitudes, hacen que el dimensionado de un Trombe, sea algo muy difícil de estandarizar. Una vez identifiquemos cuales van a ser nuestros parámetros limitantes para el diseño, podremos obtener las dimensiones óptimas en base estas.

Además hay que asegurarse que el área de muro vertical encerrada por nuestro sistema es suficiente para el calentamiento de la habitación de destino, ya que es determinante para conseguir una mayor inercia térmica.

Conocidas las dimensiones de la habitación, podremos obtener las dimensiones óptimas del muro vertical encerrado de siguiente tabla.

Área habitación (m ²)	Área de la pared vertical del Muro Trombe (m ²)		
	Lugares Templados	Lugares Fríos	Lugares muy Fríos
9 a 11	5	7	8,5
12 a 14	6,5	9	11
15 a 17	8	11	13,5
18 a 20	9,6	13,5	16,5

*Área de la pared vertical en función del área de la habitación de destino.
Material del GRUPO de apoyo al sector rural de la Pontificia Universidad Católica de Perú.*

Área habitación (m²)

En algunos emplazamientos donde pueda haber un clima más extremo, será importante atender a las temperaturas medias, ya que harán que las medidas óptimas del muro vertical varíen. La siguiente tabla, desarrollada por Juan Manuel Bohórquez Peñuela del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia, nos permite obtener el área vertical del muro, en función del área de la habitación y la temperatura exterior en invierno.

T ^a media exterior en invierno (°C)	Área de la habitación
<i>Climas fríos</i>	
-10	0.72>1.0
-7	0.6-1.0
-4	0.51-0.93
-1	0.43-0.78
<i>Climas calientes</i>	
+2	0.35-0.6
+5	0.28-0.46
+7	

*Área de la habitación en función de la Temperatura.
Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia.*

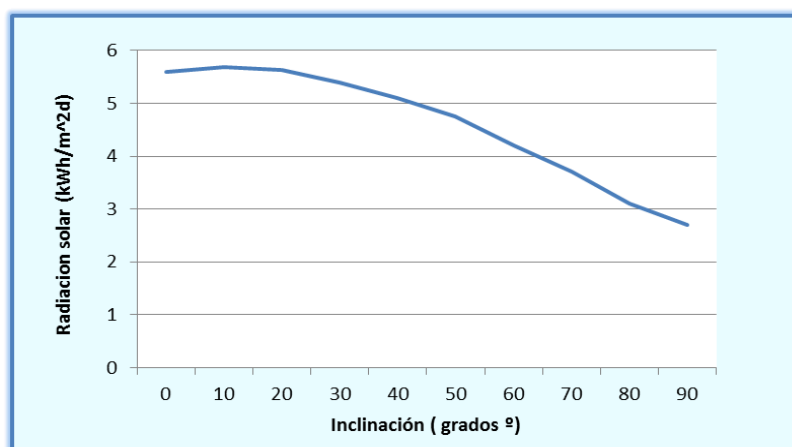
9.1.2 Inclinación y longitud de la base:

Otro de los parámetros que van a condicionar el dimensionado de nuestro sistema, es la inclinación de la superficie captadora. Este factor es determinante para el obtener un buen rendimiento de nuestra instalación y va a depender de la latitud del lugar en el que nos encontremos.

En regiones intertropicales con latitudes comprendidas entre +15° y -15°, se suele tomar como óptima la colocación horizontal de los captadores, pero por norma general podemos guiarnos por la siguiente expresión:

$$\text{Angulo de inclinación} = 3,7 + (0,69 \times \text{latitud})$$

De todos modos por tener una mayor fiabilidad, se ha realizado una simulación de la energía captada en función de las distintas inclinaciones, a fin de conocer cuál es la óptima para nuestro emplazamiento.



Radiación en función de inclinación, Cajamarca, Perú

Observando la tabla anterior, vemos que la inclinación óptima son 10°, pero evidentemente la instalación de un sistema con esta inclinación sería inviable, ya que para una altura de 2 metros, necesitaríamos una base de más de 11 metros. Dicho esto tenemos que buscar la mínima inclinación viable entre 10° y 90°.

Hay que tener en cuenta, como ya se ha mencionado anteriormente, que la longitud de la base de nuestro muro, que va a ser la dimensión que sobresalga del perímetro de la vivienda, generalmente va a estar limitada por el propio entorno o por las actividades que en él se realizan. De modo que conocida esta magnitud y la altura del muro, podemos jugar con las distintas inclinaciones posibles, y elegir la más óptima de ellas.

9.1.3 N° de orificios y diámetro:

Los agujeros del muro permiten la transferencia del aire caliente que se genera en el invernadero durante las horas de soleamiento, al interior de la habitación. El caudal de aire es mayor cuanto mayor es la diferencia de temperaturas, mayor es la sección de los agujeros y mayor la diferencia de alturas entre ambos. Adoptado el sistema de cierre mediante botellas de 20cm de diámetro y limitada la diferencia de alturas por la dimensiones del propio invernadero, el único parámetro que puede variar, es el número de agujeros. Aquí nos encontramos con una limitación constructiva debido a que los muros generalmente son muros de carga contruidos con adobe.

Área habitación (m²)	Numero de orificios de 10 cm de diámetro.		
	Lugares Templados	Lugares Fríos	Lugares muy Fríos
9 a 11	8	10	12
12 a 14	10	14	16
15 a 17	12	16	20
18 a 20	14	20	24
21 a 23	16	24	28

Número de orificios en función del área de la habitación.

Material del GRUPO de apoyo al sector rural de la Pontifica Universidad Católica de Perú.

9.2 Aplicación al caso

En este apartado se va a realizar el dimensionado de la instalación en base a la metodología anteriormente explicada, con los datos de un emplazamiento real.

9.2.1 Cálculo teórico en base a las herramientas dadas

La habitación que se pretende intervenir tiene las siguientes características:

$$\begin{aligned} \text{Planta} &= 5.8\text{m} \times 3\text{m} \\ \text{Altura} &= 2,33\text{m}. \\ \text{Área de la planta de la vivienda} &= 5,8 \times 3 = 17,4 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

a los que le corresponde un área de pared vertical encerrada por el Trombe de 8m^2 , para lugar templado (tabla del punto 10.1.1 de la PUCP).

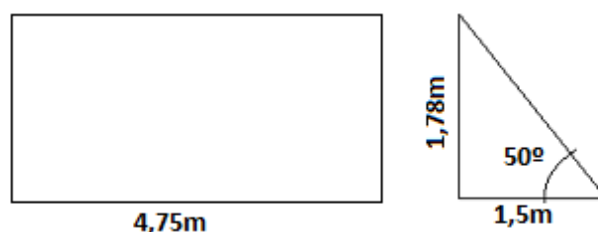
La pared vertical orientada convenientemente, tiene una superficie suficiente para albergar las dimensiones demandadas por las tablas de diseño. En nuestro caso hemos optado por:

$$\begin{aligned} \text{Altura} &= 1,78 \text{ m} \\ \text{Base} &= 4,75 \text{ m} \\ \text{Superficie de muro encerrado} &= 1,78 \times 4,75 = 8,455 \text{ m}^2 \\ \text{Área muro encerrado} &= 8,455 \text{ m}^2 > \text{Área según tablas} = 8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Aunque la altura total de la vivienda es de 2,33 m, hemos elegido una de 1,78 m, para evitar lo máximo posible la existencia de sombreados (Apartado de estudio de sombreado).

Procedemos después a verificar la validez, relacionando el área encerrada por Trombe, con el área útil (tabla. pto 4.4.2). En nuestra comunidad se rondaran los dos grados en las noches de invierno, de modo que entramos con esa temperatura y nos da un coeficiente de 0,35 y lo multiplicamos por nuestra área encerrada (17,4) y obtenemos un área recomendada de $6,09\text{m}^2$. De este modo nos aseguramos que nuestras medidas están dentro de lo estudiado.

Para nuestro caso, y en función del entorno, hemos elegido una inclinación de 50° . Por lo tanto tendremos una base de 1,5m, la cual parece una medida aceptable, haciendo que la estructura no estorbe demasiado y no sea demasiado pequeña, ya que sino disminuiría en exceso el área de captación.



Alzado y perfil de la geometría del muro Trombe

Pasamos a elegir el número de agujeros y el diámetro de estos en función de lo expresado en el punto 4.2.3., en este caso en función de nuestra tabla deberíamos realizar 16 agujeros, pero como ya se explica anteriormente, nos vemos limitados por el muro de carga, que al ser de adobe, no permite realizar cuantos agujeros queramos. Barajando los conceptos anteriores, se ha optado por realizar 8 agujeros de 20cm (el área es la misma que si realizamos 16 de 10cm de diámetro), estos

20 cm de diámetro coinciden con la dimensión de una botella de plástico de 3L de gaseosa, objeto que será utilizado como tapa de nuestros agujeros.

De modo que haciendo una recopilación de la dimensiones del muro Trombe, tenemos:

Área vertical del muro = 8,455 m²

Área Horizontal del muro = 7,125 m²

Orientación = Noroeste

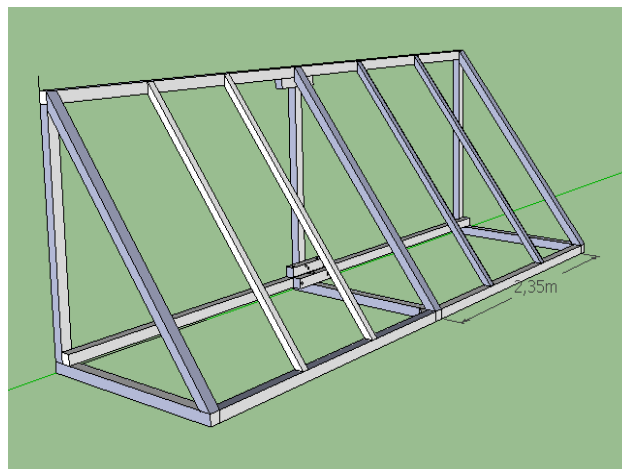
Numero de orificios = 8

Diámetro de los orificios = 20cm = Diámetro botella 3L de gaseosa

9.2.2 Justificación estructural

Ahora solo falta realizar el diseño de la estructura que dará forma a nuestro muro Trombe. Para una longitud de 4,75 m, se ha creído oportuno un diseño compuesto de;

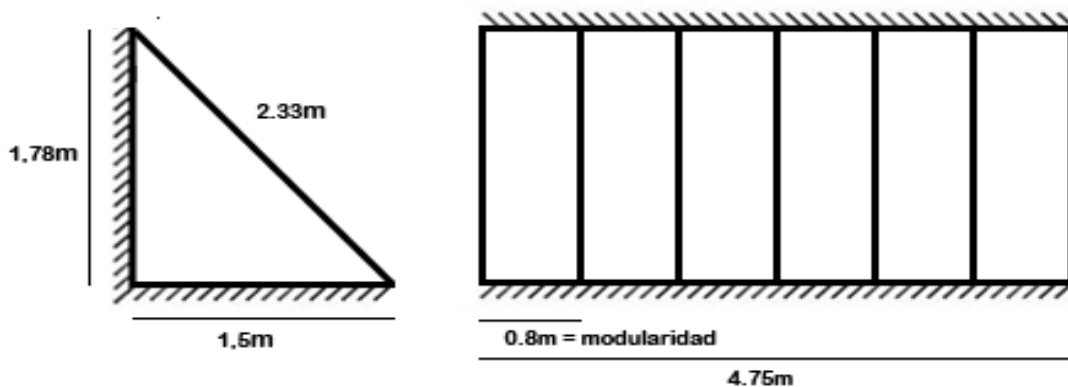
- 3 triángulos principales de madera de pino de sección 3" x 3" (Izq, Centro, Drch), empotrados en sus barras verticales y horizontales.
- 4 barras de sección 2" x 2" inclinadas equidistantes (modularidad= 0.8 m).
- 6 travesaños horizontales (2 de ellos empotrados) que apuntalan los vértices de los triángulos, tal y como se aprecia en la figura.
- Para las uniones pertinentes, se utilizan retales de madera de sección 3" x 3" y clavos de 6".



Diseño armazón de madera con Google Sketch Up

Una vez elaborada la propuesta, tenemos que comprobar, que la estructura va a soportar los esfuerzos necesarios. Para ello tenemos el siguiente esquema, una estructura con una modularidad de 0.8, y con una serie de triángulos que van a permitir a la estructura asentarse entre el terreno y la vivienda.

Como se puede apreciar, nuestro sistema está empotrado tanto en la pared vertical de la vivienda, como en el propio terreno. El empotramiento vertical, se realiza con hierros de forjado de media pulgada dispuestos como grapas contra el muro de carga, mientras que el empotramiento horizontal se produce mediante el cavado de una zanja donde inmovilizar la madera con una mezcla de piedras en posición de cuña y adobe.



A la hora de estudiar las diferentes cargas y esfuerzos que va a tener que soportar, debemos prestar especial interés a la acción del viento, ya que no tenemos sobrecargas ni por nieve, ni por uso. Para realizar el cálculo adecuado, hemos recurrido a la Norma Técnica de la Edificación 020 del Perú.

En primer lugar atendemos a la clasificación de las distintas edificaciones en función de la acción que el viento puede tener sobre ellas (Pto. 5.2. NTE.020). En nuestro caso, se trata de una edificación del Tipo 1; *Edificaciones poco sensibles a ráfagas y a los efectos dinámicos del viento, tales como edificios de poca altura o esbeltez y edificaciones cerradas con cobertura capaz de soportar las cargas sin variar su geometría.*

Más tarde procederemos a calcular la velocidad de diseño, para la cual vamos a utilizar la siguiente fórmula (Pto. 5.3 NTE.020)

$$V_h = V (h / 10)^{0,22}$$

Donde V_h = es la velocidad de diseño en la altura (h) en Km/h, V = es la velocidad de diseño hasta 10 m de altura en Km/h y h es la altura sobre el terreno en metros

Dicha ecuación, como bien se especifica en la norma, solo es válida para alturas menores a 10 metros. Para nuestro caso se trata de una altura de 1,78m, pero vamos a utilizar la altura de 10 m, para todos los valores menores a esta. Hemos tomado como velocidad del viento, la máxima registrada en el país, que se trata de 130 Km/h. La ecuación nos quedaría del siguiente modo:

$$V_h = 130 (1,78/10)^{0,22}$$

$$V_h = 130 \text{ Km/h}$$

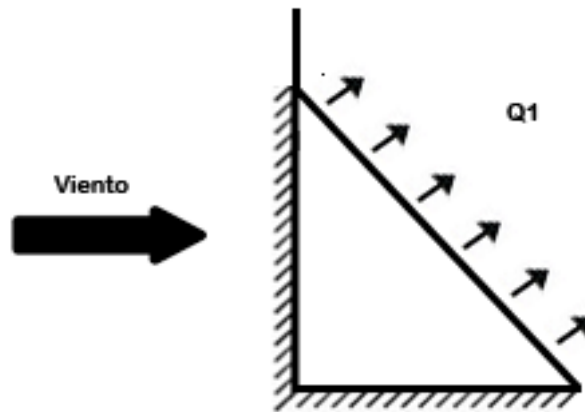
Por último tendremos que calcular la carga exterior debida al viento (presión o succión), vamos a suponer un caso estático y perpendicular a la superficie sobre la cual actúa. Esta presión va a venir determinada por la siguiente expresión:

$$P_h = 0,005 C V_h^2$$

Donde P_h es la presión o succión del viento en Kg/m^2 , C es el factor de forma (Tabla 5.4 NTE.020) y V_h = Velocidad definida en el punto anterior.

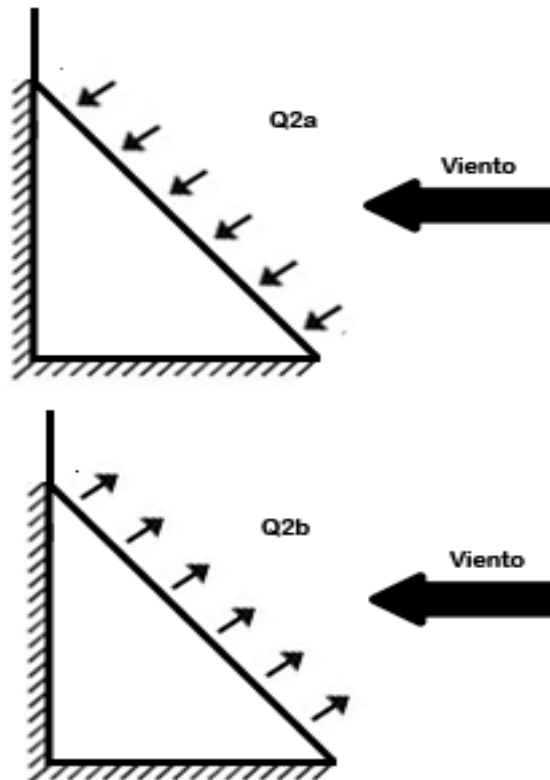
La obtención de los factores de forma, se realiza a través de la tabla indicada, en nuestro caso nos corresponden los coeficientes dados para estructuras con una inclinación entre 15° y 60° , que son los siguientes:

- Sotavento $C = -0.6$



$$Q1 = 0,005 \times 0,6 \times 130^2 = 50,7 \text{ Kg/m}^2$$

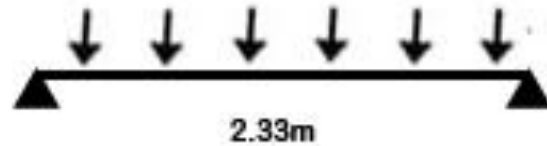
- Barlovento $C = +0.7$ y -0.3



$$Q2a = 0,005 \times 0,7 \times 130^2 = 59,15 \text{ Kg/m}^2$$

$$Q2b = 0,005 \times 0,3 \times 130^2 = 25,35 \text{ Kg/m}^2$$

Ante las tres alternativas, nos ponemos en el caso más restrictivo, que serían $59,15 \text{ Kg/m}^2$ de presión. Quedando el problema reducido a la siguiente estructura:



Vamos a plantear el estudio con una carga aproximada de 60 Kg/m², y con un modularidad de 0,8 m.

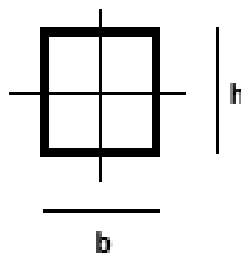
$$Q_{lineal} = 60 \times 0,8 = 48 \text{ Kg/m}$$

$$M_{flector} = q \times (L^2 / 8) = 32,57 \text{ Kgm}$$

Tomando un factor de seguridad de 1,5:

$$M = 32,57 \times 1,5 = 48,85 \text{ Kgm}$$

Ahora debemos estudiar las características de la sección para la que tenemos que realizar el cálculo, la más vulnerable. En nuestro caso, tenemos maderas de perfil cuadrado constante, de 2 y 3 pulgadas de lado, por lo que procederemos con la de 2 pulgadas, que equivalen aproximadamente a 5 cm.



$$A = h \times b = 25 \text{ cm}^2$$

$$Inercia = I = b \times h^3 / 12$$

$$W = I / (h/2) = b \times h^2 / 6 = 20,83 \text{ cm}^3$$

Solo queda averiguar el valor del esfuerzo que tiene que resistir dicha sección y compararlo con los valores establecidos en el Código Técnico de la Edificación Europeo, que se suponen aptos y extensibles para la legislación peruana. Se trata de madera de Pino C27, con una máxima tensión admisible de 270 Kg/cm².

$$M / W = 48,85 \times 100 = 4885 \text{ Kgcm}$$

$$\sigma = M / W = 48,85 \times 100 / 20,83 = 234,51 \text{ Kg/cm}^2$$

$$234,51 \text{ Kg/cm}^2 < 270 \text{ Kg/cm}^2$$

De este modo hemos podido comprobar que nuestra estructura teóricamente va a soportar sobradamente los esfuerzos a los que va a ser sometida.

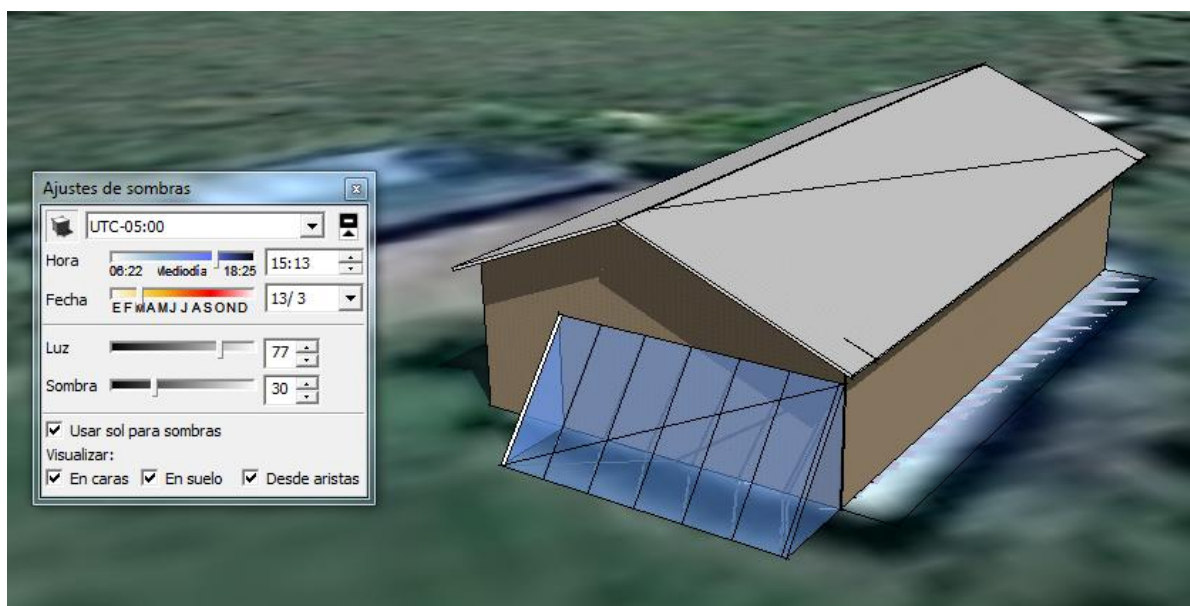
9.2.3 Análisis de los sombreamientos

Se debe estudiar el entorno de la vivienda, asegurándose que no haya accidentes geográficos, vegetación u otras edificaciones que dificulten la captación. Habrá que estudiar como afectan las sombras que estos elementos producen en función de la hora del día y del mes en el que nos encontremos para juzgar la viabilidad de la instalación.

Con este fin, se ha utilizado Google Sketchup para realizar un modelo virtual de la estructura y para evaluar las condiciones de radiación del muro en función de su posicionamiento, tal y como se explica en el *Anexo II, "Simulación de sombreamientos"*. Google Sketchup te permite, trasladar la localización exacta (latitud y longitud) de Google Earth, consiguiendo así una simulación bastante precisa de las condiciones del terreno donde se aplicara la tecnología.

Las siguientes imágenes son impresiones de una simulación de la influencia de las sombras con SketchUp, que te permite el estudio de estas, a lo largo de todos los meses del año y en las distintas horas del día. El estudio teórico de las sombras, determino que durante gran parte del año, nuestro muro recibía radiación suficiente, también se observa que antes del anochecer los sombreamientos son mínimos o inexistentes, y por lo tanto se conseguirá un mayor rendimiento.

De modo que la localización de nuestro muro es óptima, ya que son esas horas las que más nos interesa que funcione con alto rendimiento, para que caliente la habitación de cara a la noche, que es lógicamente, cuando más frío hace en las viviendas.



Google SketchUp puede descargarse gratuitamente y de manera legal en <http://sketchup.google.com/intl/es/download/index.html>

A pesar de que la utilización de este programa puede ser de gran utilidad y puede ahorrar mucho tiempo, es imprescindible la valoración de la viabilidad de la instalación sobre el terreno, conocer en vivo la vivienda en cuestión y analizar el entorno.

9.3 Presupuesto: Materiales y herramientas

A continuación se detallan los costos de los materiales utilizados en la instalación del muro, así como las herramientas necesarias, o por lo menos recomendables durante la instalación. Debido a la creciente variabilidad de los precios en la región, estos precios pueden sufrir variaciones.

Nº	Materiales	Precio Unidad (S./)	Precio Global (S./)
10	Yeso en saco 10kg	3,5	35
1	Clavo 4" (1kg)	5	5
1	Cola Blanca 1Galón	19,5	19,5
1	Aceite de Linaza	24,4	24,4
10	Sacos vacíos de arpillera de 50kg	1,2	12
36	Tornillo p/ aglomerado 6x120	0,32	11,52
1	Látex Negro 1 Galón	21	21
9	Listones de 3"x3"x2,5m	16,22	145,98
3	Listones de 3"x3"x1,5m	11	33
3	Listones de 3"x3"x1,85m	11	33
3	Listones de 2"x2"x2m	6	18
4	Listones de 2"x2"x2,5m	8	32
7	Tapajuntas de 2,5m	4	28
1	Jebe 10 cámaras de bicicleta	6	6
1	Saco de 50kg de Cal	30	30
1	1/2 kg de clavos de 1/2"	3	3
1	Plástico de Invernadero (3x10)	130	130
Total:			587,4 S./

*La cantidad de alguno de los materiales es excesiva, pero no se comercializaba en menor cantidad. De modo que el presupuesto de instalación del sistema, podría verse disminuido ligeramente, si se pretende instalar más de un sistema.

A continuación se detallan las principales herramientas necesarias durante el proceso:

Herramientas
Brochas 2"
Brochas 4"
Cinzel 7/8" x 12"
Llana de plástico 305x176 mm
Lija de madera 9"x11" grano medio
Pares de guantes
Taladro
Cubos
Palas
Picos
Diablo, sino cinzel
Sierra Madera
Nivel
Cúter

10 Simulaciones térmicas

En esta parte se lleva a cabo un cálculo de la ventilación natural en los dormitorios del caserío elegido para la primera intervención, acorde al estado actual de los huecos y su uso. Adicionalmente, se simula térmicamente el edificio con el objetivo de evaluar el confort en su interior, proponiendo distintas actuaciones de mejora en el mismo con el fin de establecer un orden de prioridad para futuras intervenciones. La explicación detallada del proceso de realización de las simulaciones, se adjunta en el *Anexo III “Simulaciones térmicas”*.

10.1 Objetivos

- Valorar la utilidad de la instalación de estos sistemas para la localización del proyecto.
- Cálculo de la ventilación natural debido a la falta de acristalamiento en ventanas y la apertura de puertas.
- Creación de un modelo de simulación en condiciones climáticas y de uso similares a la realidad con el fin de evaluar el aporte calórico del invernadero propuesto.
- Simulación de diferentes hipótesis de actuación y establecimiento de un orden de prioridad en función de los resultados obtenidos.
- Estudiar la influencia del aislamiento y la inercia térmica en el rendimiento.

10.2 Metodología

Para la simulación del edificio se recogió información durante el mes de septiembre de 2011, en el proceso de evaluación de las distintas casas de la comunidad y la posterior elección y actuación (5-7 octubre 2011) reduciendo infiltraciones e instalando el primer Muro Trombe Invernadero de la comunidad.

Para la modelización matemática se utilizó el programa Design Builder 2.3.6.005 con el motor de cálculo Energy Plus 6.0.0.023. En la simulación del edificio se optó por la “Ventilación Calculada” con el fin de evaluar la ventilación natural a través de infiltraciones, puertas, huecos de ventanas y las posteriores rejillas del invernadero. A partir de este modelo, se evaluó la evolución de temperaturas en dos semanas significativas (1-7 de enero, 1-7 de agosto (**Pto. 4.1**)). Así mismo, se realizó un análisis CFD del dormitorio para observar el movimiento del aire y la distribución de velocidades y temperaturas en un momento específico de funcionamiento del invernadero (14:00, 1 de enero). A continuación se exponen las hipótesis de trabajo más relevantes de la modelización:

Clima: A partir de los datos de promedios de temperaturas de la Granja Porcón, a pocos kilómetros de Pucará, en el Atlas solar del Perú elaborado por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) y el DEP-MEM (Ministerio de Energía y Minas) y ante la imposibilidad de conseguir datos horarios representativos, se tomaron los datos del IWECC (International Weather for Energy Calculation) para clima andino en la zona del Cuzco con características similares, modificando la latitud para el correcto cálculo de sombreadamientos.

Ganancias internas: El edificio tiene dos habitáculos en planta baja y dos gateras en la parte superior. Las gateras tan solo se usan como almacén para objetos en desuso y no existe ningún tipo de producción de calor en el interior. En los habitáculos del nivel inferior duermen tres personas. Para su simulación se tuvo en cuenta su producción de calor en un horario nocturno de 21:00 a 9:00 de la mañana.

Cerramientos: El caserío se asienta directamente sobre el terreno, los muros de carga son de adobe con un grosor medio de 40cm. La conductividad estimada es de 0,8 W/mK. El forjado de separación con las gateras está formado por 2 centímetros de cañizo y 3 de una mezcla de tierra y paja. La cubierta es una calamina metálica de apenas 2mm de espesor.

Aberturas: En el dormitorio se tienen tres huecos de unos 75cm por 50cm. En el momento de la intervención no tienen acristalamiento y tan solo están parcialmente cubiertos con algunos adobes y un saco. La puerta, 1,8m por 1m, permanece abierta durante todo el día. Solo se cierra en horario nocturno con un muy bajo nivel de estanqueidad.

Ventilación y estanqueidad: El nivel general de estanqueidad es muy bajo. Existen grietas visibles en el forjado que serán tratadas con una mezcla de barro y paja durante la intervención, así como el encaje entre los marcos de puertas y huecos con el muro de adobe. Energy Plus estima la renovación del aire, como suma de infiltraciones y la abundante ventilación natural, fruto de la casi continua apertura de los huecos, la acción del viento y la diferencia de temperatura con el exterior.

Muro Trombe: El muro instalado consta de un plástico Agrofilm clavado con jebe sobre una estructura de madera en forma de triángulo que forma 50° con el terreno. Para la transmisión solar directa se considerada un valor conservador de 0,47. La transferencia del aire caliente al interior se lleva a cabo a través de 8 agujeros de 20cm de diámetro. Para la simulación se consideran 5 con un área equivalente, debido a la limitación en el tamaño de rendijas de Design Builider. El coeficiente de descarga introducido es de 0,5 y el caudal es estimado por Energy Plus en función de la diferencia de temperatura entre el dormitorio y el invernadero. Las rejillas permanecen cerradas en horario nocturno.

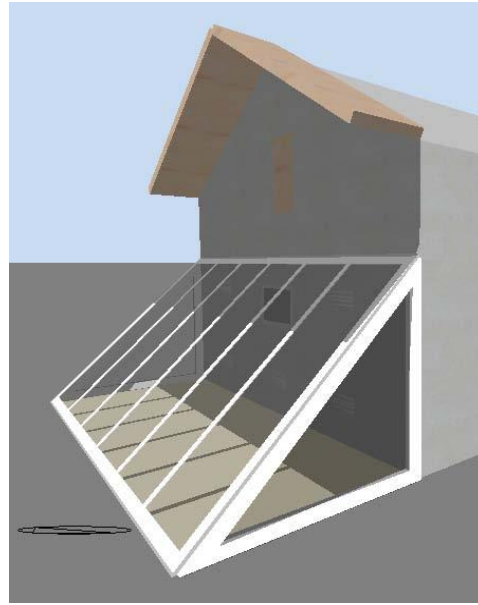
10.3 Modelos analizados

Estado Actual: La primera simulación trata de acercarse a la realidad actual del caserío, en función de la información recogida sobre el terreno durante el mes de septiembre del 2011 y cuyo objetivo es validar el modelo y las conclusiones posteriores sobre las intervenciones en el caserío. Sobre este modelo se analizarán los efectos de una mejora en el aislamiento y las infiltraciones antes de instalar el Muro Trombe-Invernadero.



Modelo real y simulado del caserío analizado.

Casa con Invernadero: En este modelo se simula el aporte calorífico del Muro Trombe Invernadero, tratando de emular la realidad térmica de la intervención en el caserío. En Este modelo, sin embargo, no se tiene en cuenta el cambio de hábitos en el uso de los huecos ni su sellado. Con este modelo se pretende conocer el efecto del invernadero sin un uso correcto del mismo.

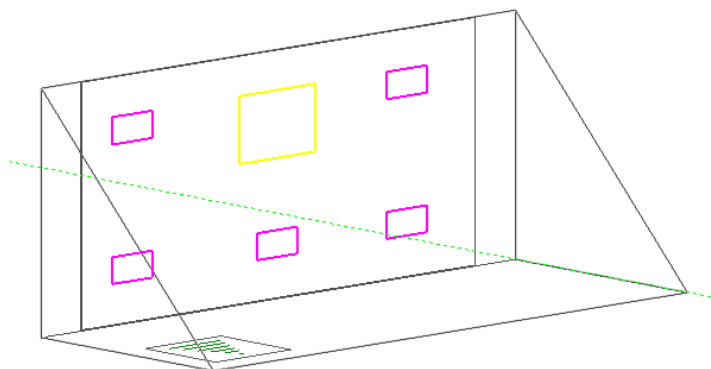


Modelo real y simulado del invernadero.

Casa con Invernadero y sellada: En este caso se aplica un buen uso del invernadero, con sellado de huecos y uso correcto de los mismos, estableciendo una apertura de una hora a las 12:00 para ventilación.

Casa con Invernadero, sellada y aislada: Se perfecciona el modelo anterior con el aislamiento de muros y forjado. A los muros de adobe se les añade una capa de paja ($0,11\text{W/mK}$) de 15cm apoyada en un entramado ligero de madera. En el forjado se incrementa el espesor de la capa tierra-paja de 3 a 15 cm. La mejora redunda en una leve reducción de las infiltraciones en el dormitorio.

Modelo CFD del dormitorio: Finalmente, a partir del modelo con invernadero y sellado, se simula mediante CFD el interior del dormitorio principal a las 14:00 del 1 de enero. Con esta simulación se pretende observar el movimiento del aire en horario de apertura de rejillas junto con el funcionamiento del invernadero y el confort en el dormitorio.



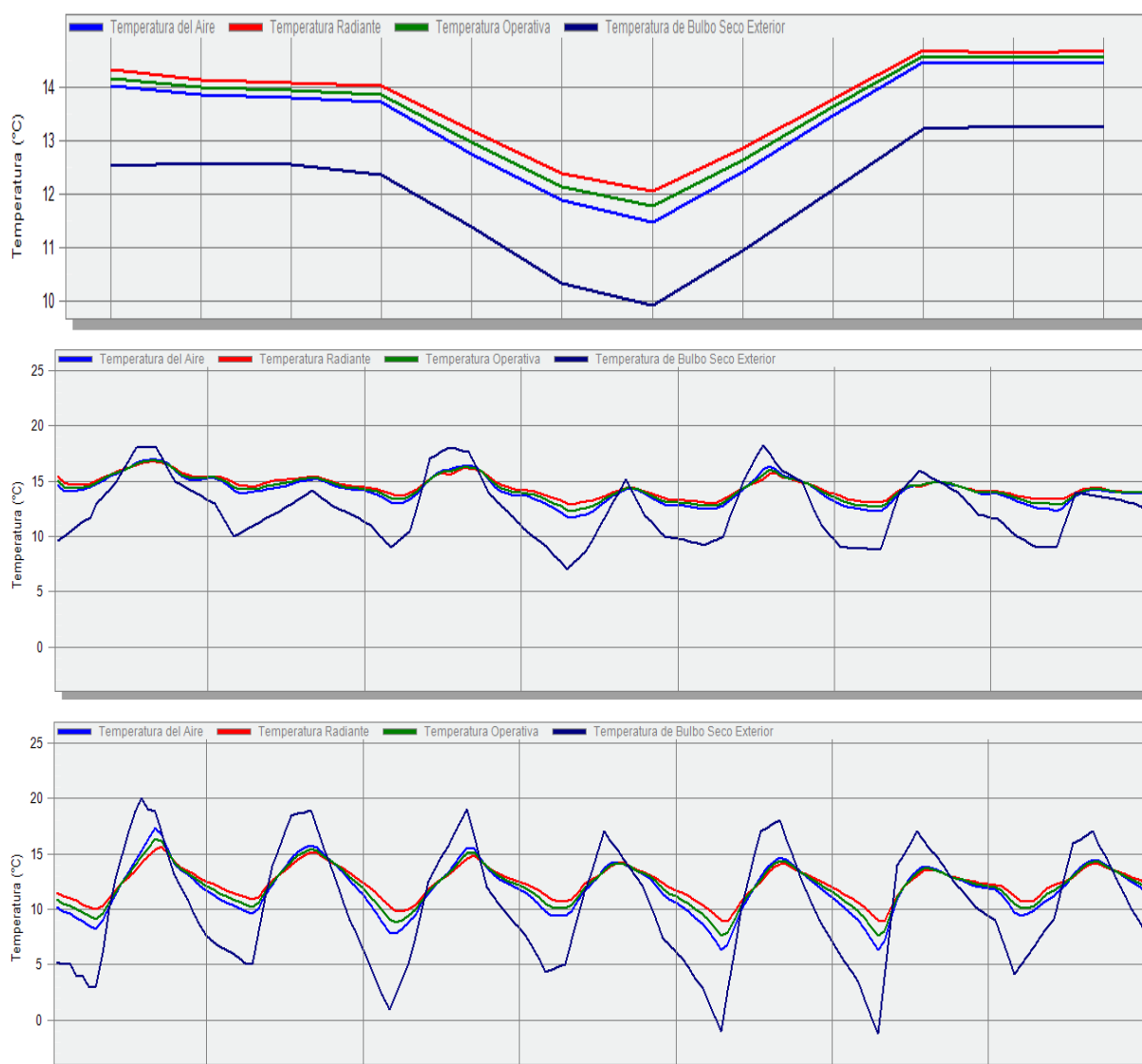
Modelización del invernadero con hueco existente y rejillas.

10.4 Resultados

10.4.1 Estado Actual

Se analizan las temperaturas de bulbo seco, radiante y operativa en el dormitorio. La temperatura operativa es una media de la temperatura del aire y la radiante en paredes, suelos y techo, de modo que nos sirve para evaluar la sensación de confort en el interior. La media anual es de 13,67°C, 1,6°C por encima de la temperatura exterior. Su evolución a nivel de medias mensuales, es paralela a la temperatura exterior. Sin embargo, en el estudio de la evolución diaria (1ª semana de enero y julio), puede verse el predominio del efecto de la inercia térmica, de forma que la temperatura interna apenas varía 2-3°C en enero y 5°C en julio, mientras la exterior llega a oscilar hasta 20°C entre la máxima y la mínima diarias.

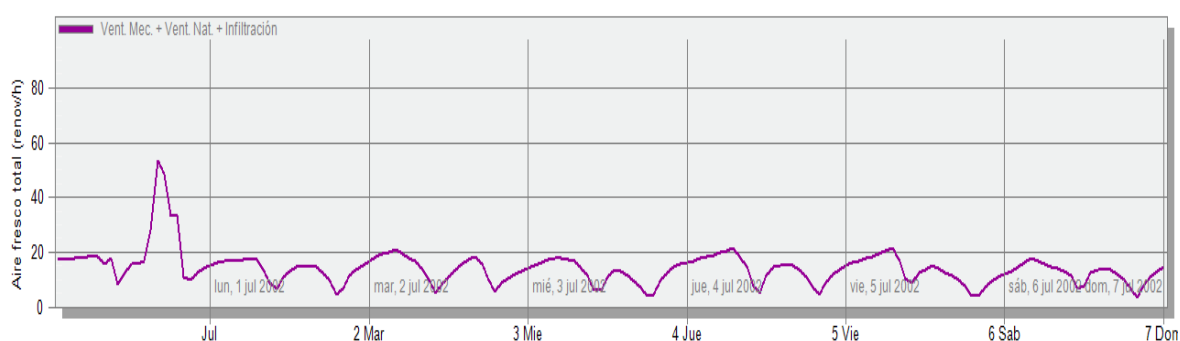
El efecto de las ganancias internas y solares es prácticamente nulo. La ventilación natural es extremadamente alta, sobre todo durante el día, cuando la puerta principal permanece abierta, justo en frente de los huecos de las ventanas sin acristalamiento. La media anual es de 16,43 ren/hora.



1ª gráfica: evolución mensual de temperaturas media, radiante y operativa del dormitorio en contraste con la temperatura exterior. 2ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de enero. 3ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de julio.

Cualquier medida de mejora del confort interno pasa por reducir infiltraciones y cerrar los huecos para controlar la ventilación. En una primera estimación, podría pensarse en mejorar el aislamiento de la casa, antes de intervenir con la construcción del invernadero, con el objetivo de aumentar la temperatura en el interior. Esta hipótesis fue simulada, añadiendo 15 cm de paja por el interior de los muros de adobe. El efecto, sin embargo, fue prácticamente inapreciable. El aislamiento evita la fuga de calor desde un local hacia el exterior, pero esta circunstancia solo tiene lugar si existe un gradiente de temperaturas suficientemente alto. En este caso, sin ganancias solares ni ganancias internas, el resultado apenas refleja un incremento de 2 décimas en la temperatura operativa del interior.

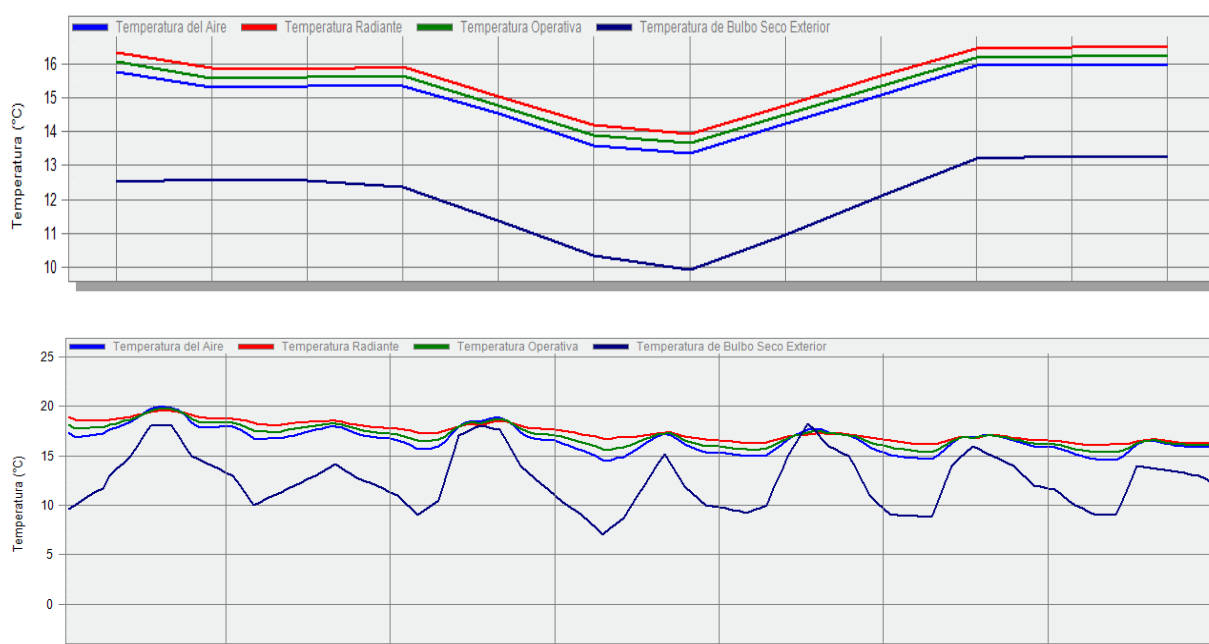
En caso de calefactar el interior, la reducción del consumo sería del 15%. Sin embargo, esta hipótesis no tiene mucho sentido si se tiene en cuenta el alcance del proyecto y la no previsión de una instalación de calefacción en el futuro.

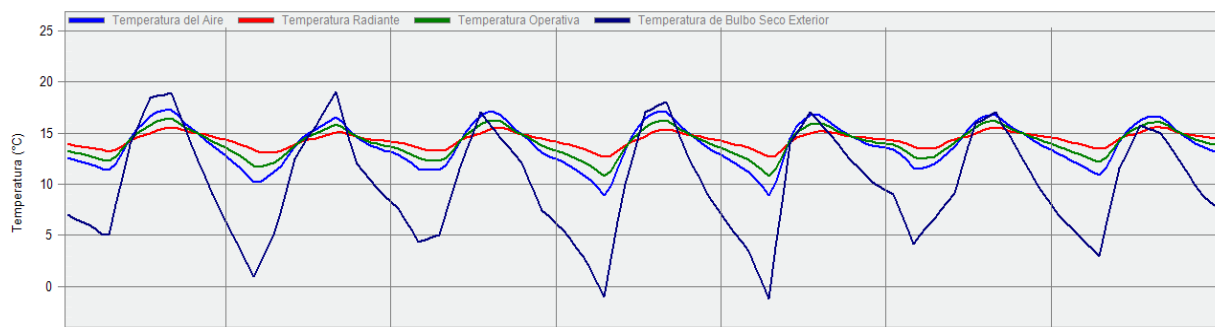


Evolución horaria de la ventilación natural durante la primera semana de julio.

10.4.2 Casa con Invernadero

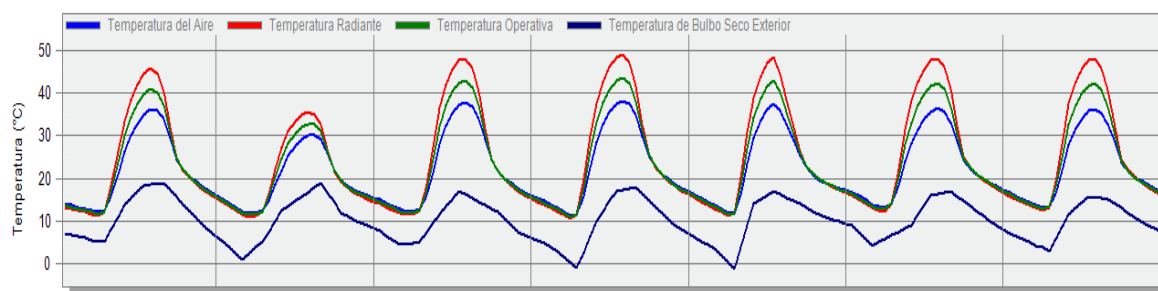
La temperatura media operativa está en 15,3°C, 1,63°C por encima del caso base. Tal y como se cita en el apartado anterior, esta simulación no incluye la instalación del acristalamiento en los huecos ni el cierre de la puerta principal durante el día. Por tanto, gran parte del calor ganado en el invernadero, se fuga por el exceso de ventilación.





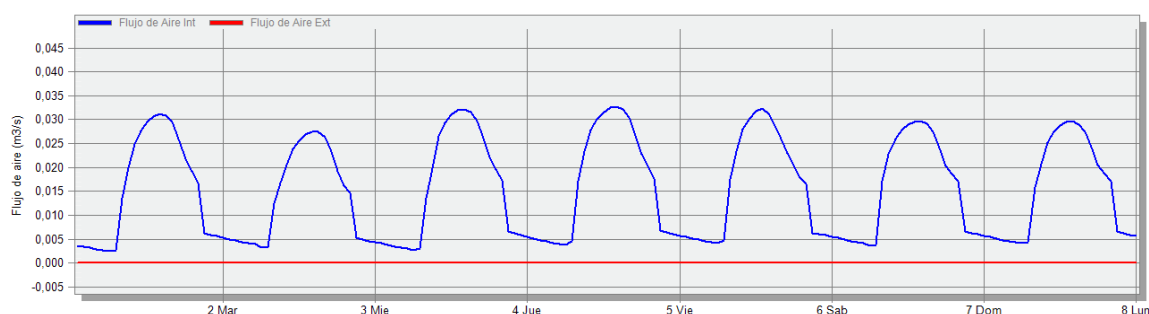
1ª gráfica: evolución mensual de temperaturas media, radiante y operativa del dormitorio en contraste con la temperatura exterior. 2ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de enero. 3ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de julio.

La temperatura del aire en el invernadero varía entre los 25-30°C en enero hasta los 35-40°C que se alcanzan durante los meses de junio, julio y agosto, el periodo más desfavorable del año en términos de temperatura exterior. Este aspecto es interesante desde el punto de vista del funcionamiento del invernadero.



Evolución horaria de temperaturas en el interior del invernadero durante la primera semana de julio.

La transferencia de calor hacia el interior se realiza a través de las rejillas superiores e inferiores del muro de separación en horario diurno. El flujo máximo por agujero es de unos 0,015 m/s y durante la noche es prácticamente nulo gracias a la colocación de las botellas de cierre.



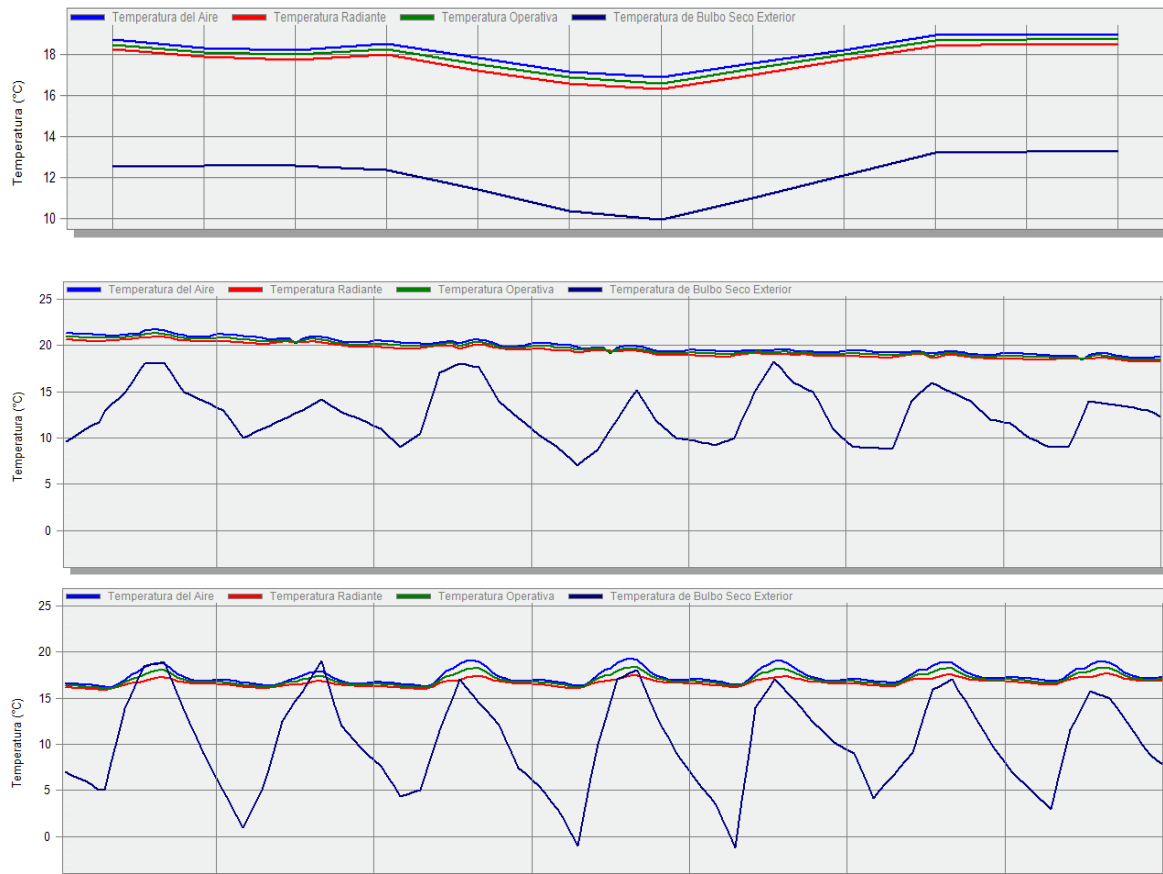
Evolución horaria del flujo de aire a través de las rejillas superiores del invernadero (cada rejilla del modelo se corresponde con dos agujeros reales) durante la primera semana de julio.

10.4.3 Casa con Invernadero y sellado

Una vez tenemos un incremento considerable de las ganancias solares del dormitorio, una reducción de las infiltraciones hasta 0,6 ren/hora produce un efecto muy beneficioso en la efectividad del funcionamiento del invernadero y el confort, de forma que la media de la temperatura

operativa pasa a ser de 17,94°C, 2,64°C más que en el caso anterior y un 31% de mejora con respecto del caso base.

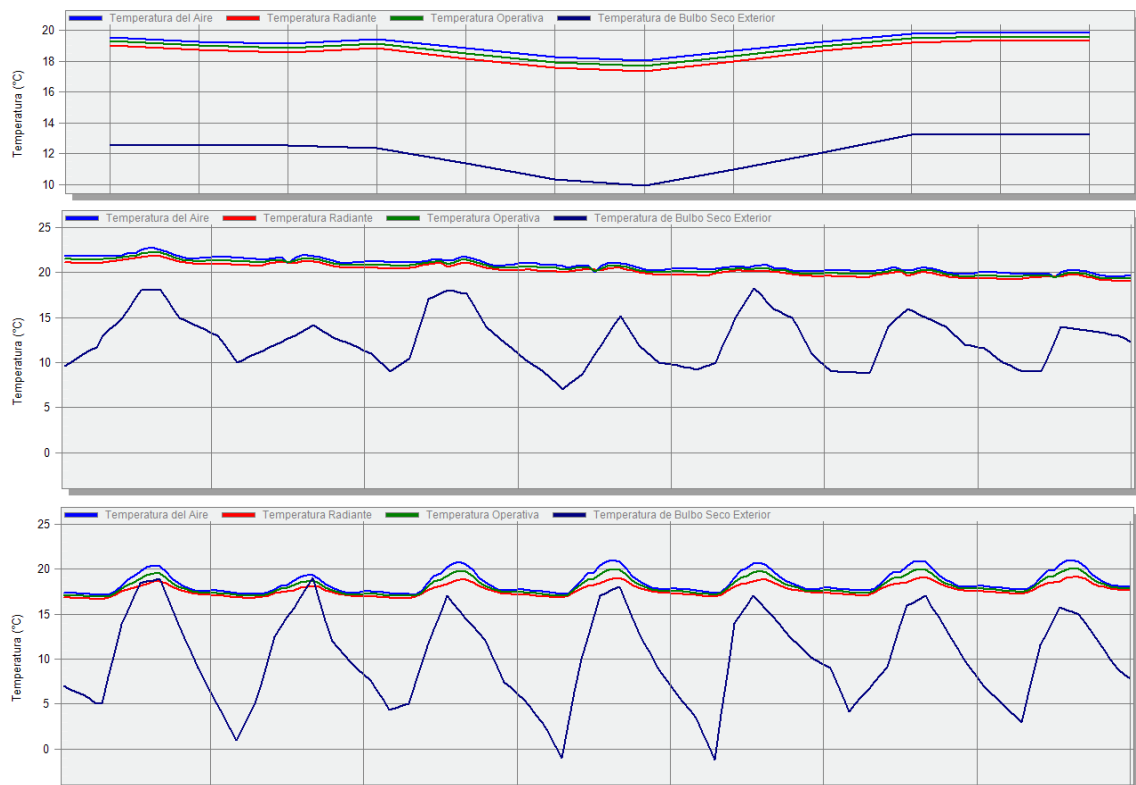
Es remarcable el hecho de que, en este caso, la temperatura del aire pasa a estar por encima de la temperatura radiante de los cerramientos, algo que no ocurría en los casos anteriores.



1ª gráfica: evolución mensual de temperaturas media, radiante y operativa del dormitorio en contraste con la temperatura exterior. 2ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de enero. 3ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de julio.

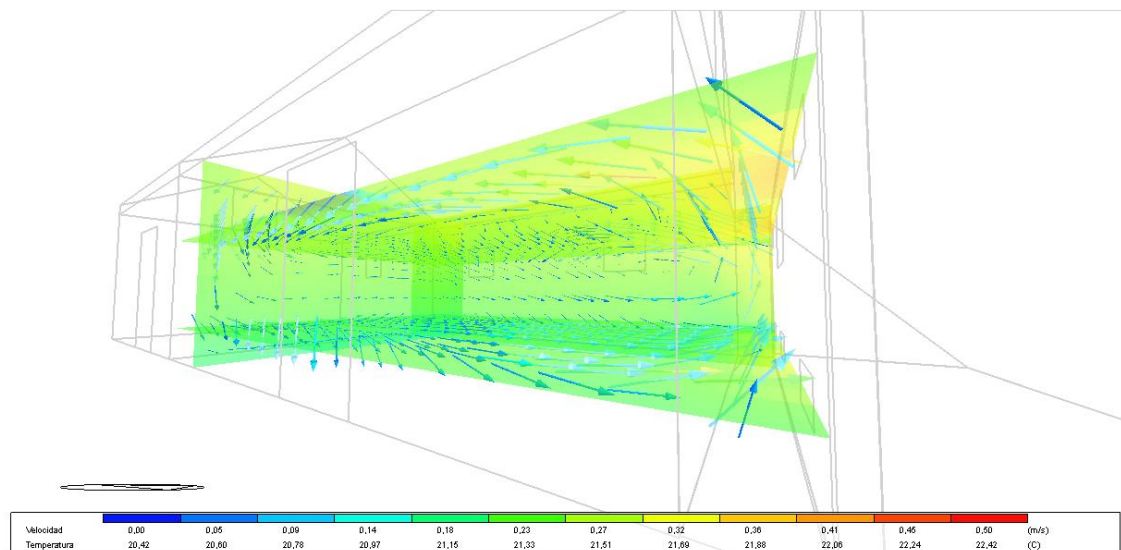
10.4.4 Casa con Invernadero, sellada y aislada

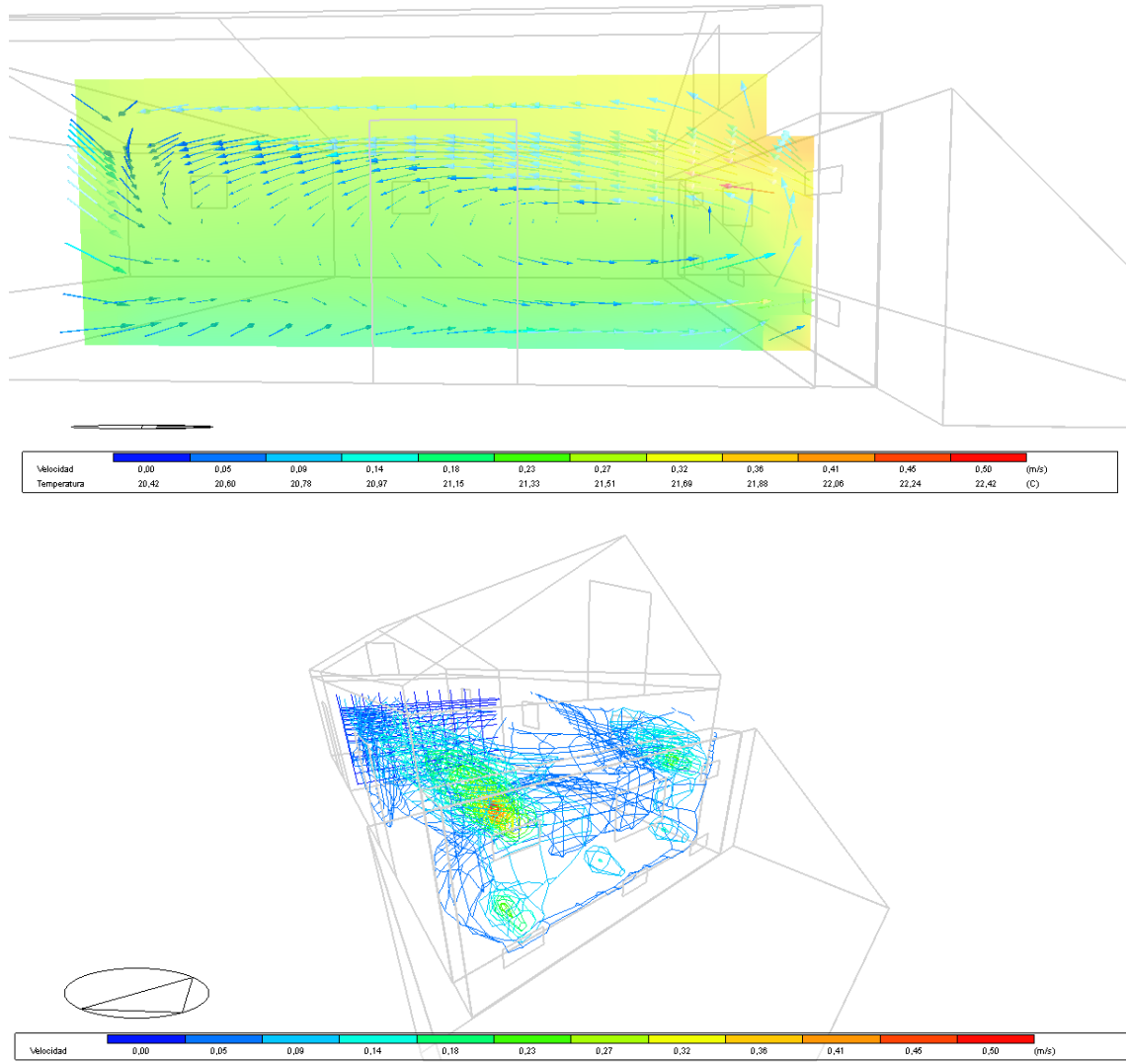
Finalmente, cuando ya tenemos un gradiente de temperaturas considerable gracias al incremento de las ganancias solares y el sellado del dormitorio, el efecto de una mejora del aislamiento será más perceptible. En este caso se plantea un entramado ligero de madera relleno de 15cm de paja por el interior de los muros de adobe, además de un incremento de la capa de tierra-paja en el forjado de separación con las gateras. En estas condiciones la temperatura operativa se incrementa 0,63°C con respecto del caso anterior. La temperatura media anual del aire es de 19,16°C (la operativa 18,56°C). Puede decirse que estamos en un margen razonable de confort con un nivel de abrigo suficiente.



1ª gráfica: evolución mensual de temperaturas media, radiante y operativa del dormitorio en contraste con la temperatura exterior. 2ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de enero. 3ª gráfica: evolución horaria de temperaturas durante la primera semana de julio.

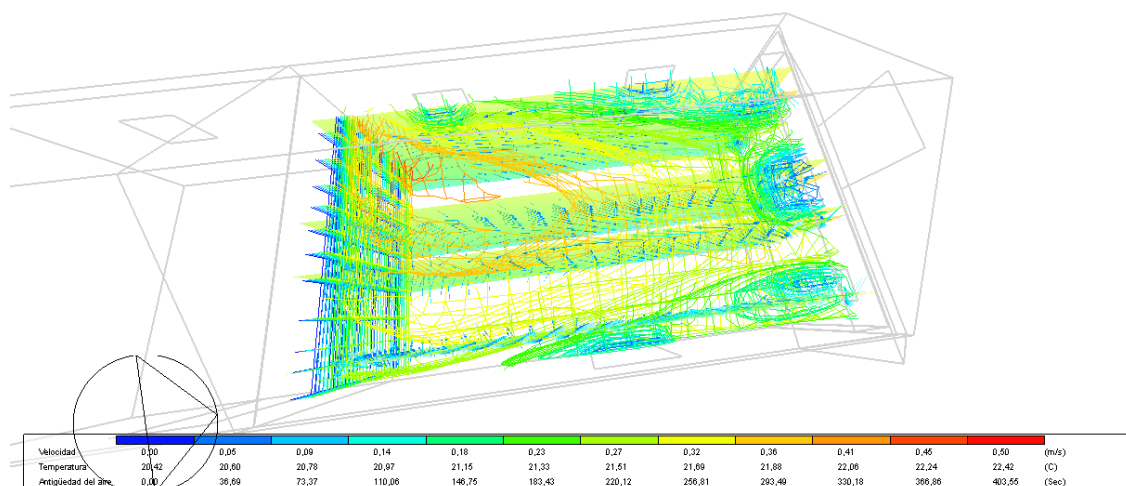
10.4.5 Modelo CFD del dormitorio





Distribución de temperaturas y velocidad del aire en el dormitorio a las 14:00 del 1 de enero.

Tal y como puede verse en la Figura 12, en el interior de la estancia se va a producir un efecto termosifón, de forma que el aire caliente que se introduce por las rejillas superiores va hacia el fondo del dormitorio, mientras el aire frío viaja cercano al suelo y se transfiere al invernadero por las rejillas inferiores. El gradiente de temperaturas es de aproximadamente 2°C entre la parte superior y la inferior, y la velocidad del aire no sobrepasa los 0,6 m/s.



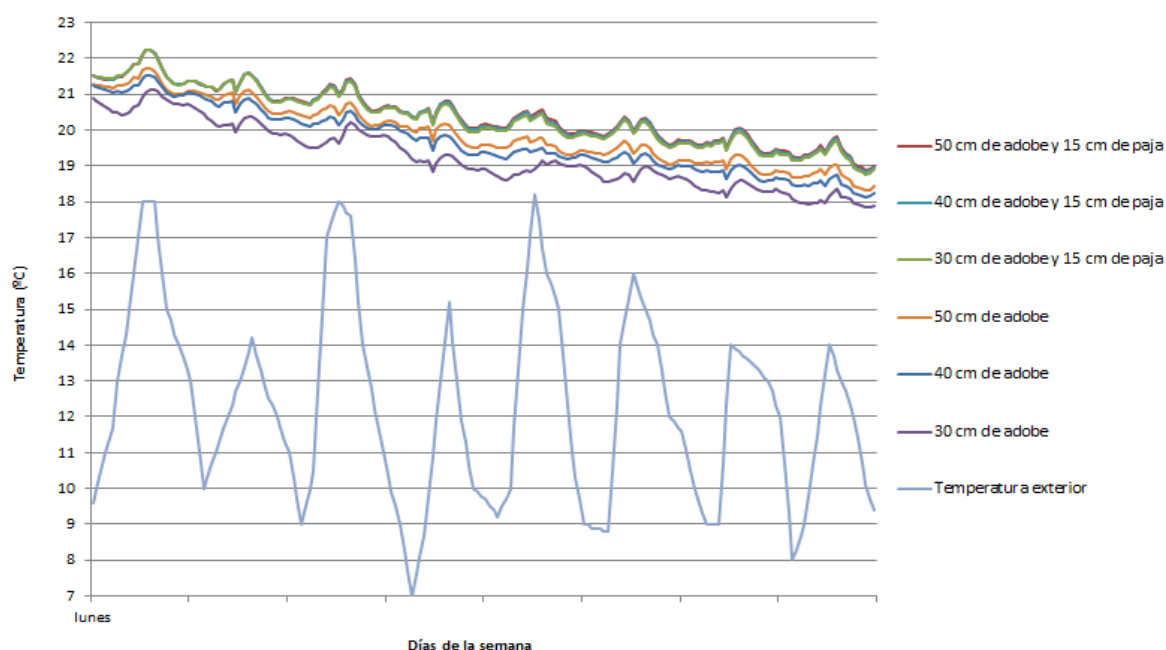
Antigüedad del aire combinada con temperaturas y velocidades.

Analizado el movimiento del aire, se tiene que la zona donde más se embolsa el aire de la habitación, es la esquina del fondo, opuesta al invernadero y la puerta de entrada. Sin embargo, el tiempo de refresco no supera los 8 minutos.

10.4.6 Modificaciones del aislamiento y la masa térmica

Se ha realizado además un estudio de la variación de la temperatura operativa dentro de la vivienda, en función de la elección de distintos espesores de los muros de adobe y la paja. Para la simulación se ha utilizado el modelo con invernadero, sellado y aislado.

Hemos dado 3 valores distintos al espesor del muro de adobe; 40cm, que era nuestro valor inicial, 30cm y 50cm. Para cada uno de ellos hemos realizado dos supuesto, uno con 15cm de paja y otro sin ella. Los 6 casos de estudio han sido comprados gráficamente



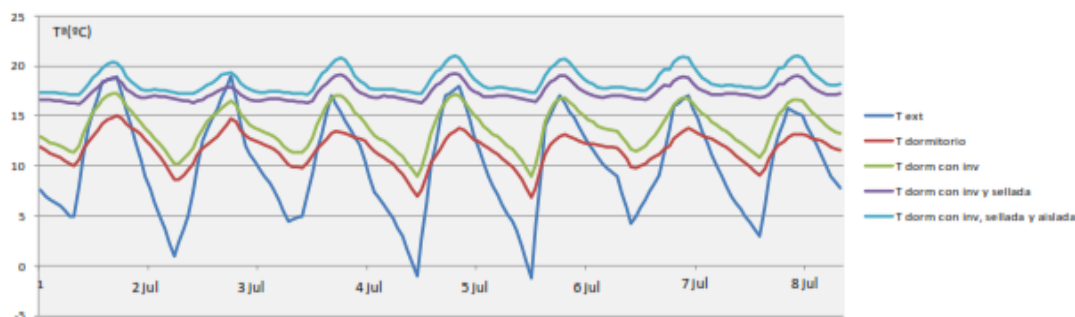
Por los resultados se comprueba, en primera instancia, la importancia de ambos parámetros sobre la temperatura operativa de la habitación.

Observamos que la acción de la masa de adobe del muro, reduce las fluctuaciones de la temperatura en la estancia, mientras que la acción del aislamiento de paja no influye en el comportamiento del gráfico de temperaturas, ya que podemos ver que se producen mínimos y máximos similares en los mismos puntos, y los incrementos de temperatura son próximos.

Otro hecho a resaltar, es que la vivienda sin aislar, sufre considerables cambios de temperatura en función de la variación del espesor de los adobes. Esta variación es de casi un grado entre un espesor de 30 cm y uno de 50 cm. Sin embargo, cuando tenemos la vivienda debidamente aislada, la variación del espesor de los muros de adobe tiene menos influencia en la temperatura operativa del dormitorio.

10.5 Conclusiones

- Pese a no disponer de unos datos climáticos específicos de la región de análisis, las valoraciones de la evolución de temperaturas parecen suficientemente parejas a la realidad como para permitir establecer un criterio de priorización de intervenciones valorando las mejoras que cada medida puede suponer.
- Para el cálculo de la ventilación natural, la metodología utilizada estima en 16,47 l/s/hora de media, un valor elevado pero esperable si se tiene en cuenta la apertura casi continua de puertas y ventanas sin acristalamiento.
- El efecto térmico imperante en el interior del dormitorio es la inercia. Este efecto es positivo en el sentido que protege a los ocupantes de los mínimos diarios de temperatura en el exterior. Sin embargo la temperatura media está en 13,67°C, un valor de claro discomfort térmico.
- La primera actuación que se recomienda es la reducción de pérdidas térmicas por hiperventilación. En primer lugar habría que acristalar huecos y reducir infiltraciones, bien sea sellando con una mezcla de barro y paja los huecos visibles o colocando burletes para mejorar el cierre de los marcos.
- La segunda actuación pasa por el incremento del calor en el interior. Descartado el sistema de calefacción, es necesario incrementar las ganancias solares. El diseño del Muro Trombe-Invernadero propuesto, si bien podría mejorar considerablemente su rendimiento incrementando la transmitancia del Agrofílm.
- El sombreado del alero disminuye el rendimiento en los meses de diciembre y enero. Existen modelos de calentadores de aire en cubierta que podría transferirse al dormitorio, pero su diseño encarecería el sistema, de modo que quedan fuera del alcance del presente proyecto.



Comparativa evolución horaria de temperaturas en la primera semana de julio de los cuatro modelos propuestos.

- Finalmente, el incremento de aislamiento que parecería ser prioritario, solo tiene sentido una vez la temperatura del interior es sensiblemente superior a la exterior gracias al aporte de ganancias solares o internas.
- Analizada la temperatura radiante de los cerramientos del dormitorio, una posible mejora del confort interior en el futuro pasaría por colocar algún tipo de suelo tipo tarima (ventilada y con impermeabilización suficiente).

11 Instalación

Este apartado está basado en la experiencia de instalación de muros Trombe dentro del proyecto “Mejora de las condiciones de vida de los habitantes de la comunidad de Pucará”.

A continuación solo enumera la secuencia de actividades para la instalación de nuestro calefactor solar. Este proceso es detallado en el Anexo I “Instalación”, con el proceso integro de la instalación de un muro Trombe los días 5,6 y 7 de septiembre de 2011:

- Excavar la zanja: con las medidas de la base de nuestro calefactor.
- Zanja donde emplazar el muro de apoyo.
- Construcción del muro de apoyo: se construye un pequeño muro de apoyo, que eleve el calefactor para evitar filtraciones y aumentar su protección.
 - Conseguir piedras grandes
 - Preparar mezcla de barro con paja
 - Hacemos un hoyo en el que removemos la tierra.
 - Encharcamos con agua el hoyo.
 - Cortamos paja o “ichu” (planta característica de la zona).
 - Esparcimos la paja en el barro y mezclamos.
 - Con el adobe levantamos el muro de apoyo, cimentado por grandes piedras.
 - Nivelado. Tenemos que comprobar que el muro se ha construido correctamente.
 - Agujeros en el adobe, por donde se producirá el flujo de aire entre el interior y el exterior de la habitación.
- Aislamiento de grietas, puertas y ventanas.
- Enyesado de la pared. hay que preparar la pared para la pintura.
- Pintar de negro la pared.
- Acondicionamiento de la base del Muro Trombe
- Piedras para la base del Muro Trombe para aumentar la masa térmica del sistema.
- Tratamiento de la madera. Lijado y barnizado.
- Montaje del armazón de madera.
- Agarrar al muro y aislar. Se une al muro de la vivienda, mediante fierros de forjados actuando como grapas.
- Cubrir con el plástico y colocar los tapajuntas en cada unión.
- Instalar puerta de acceso al interior del calefactor.

12 Conclusiones generales

- El muro Trombe es una tecnología adecuada para el calentamiento de viviendas gracias a la acción de la radiación solar. Sobre todo en proyectos de ayuda al desarrollo de comunidades precarias y con pocos recursos económicos.
- Existen suficientes alternativas tecnológicas, como para plantear su instalación en muchas localizaciones distintas, pudiéndose adaptar a las condiciones de temperatura, irradiancia, inclinación del sol, entorno, dimensiones de la vivienda y recursos económicos, muy variables.
- El proceso de diseño de muros Trombe, es difícil de estandarizar, para cada localización, entorno y vivienda, se precisa de un proceso diferente e independiente.
- Las temperaturas alcanzables gracias a la instalación de nuestro modelo inclinado, pueden dotar a la vivienda de un confort térmico suficiente, si se realizan las capacitaciones pertinentes.
- El proceso de instalación de dichos calefactores solares es perfectamente abordable por personal con nociones mínimas de trabajo con la madera, por ello, se entiende que es una tecnología replicable por los habitantes de la comunidad de manera independiente.
- Gracias al proceso de simulación descrito, podemos afrontar la implementación de estos sistemas con menos incertidumbre sobre su rendimiento, para cada caso.

13 Bibliografía

- *“Kofñiwasi (Casa caliente).” Grupo de apoyo al sector rural, Pontificia Universidad Católica de Perú.*
- *“Norma Técnica de Edificación 020 Cargas”. Instituto Nacional de Investigación y normalización de la vivienda del Perú.*
- *“Calefactor solar SENCICO: Responsabilidad Social”. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú.*
- *Andrés Arturo Mendoza Ruiz. “Optimización de un muro Trombe de 3m x 2m para zonas altoandinas a una latitud de 14°s”. Pontificia Universidad Católica del Perú*
- *“Participación comunitaria en la implementación de muros Trombe”. Organización Panamericana de la Salud*
- *Juan Manuel Bohórquez Peñuela. “Muro Trombe” Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia*
- *“Ficha técnica Agrolene”. Litec, Soluciones para la agricultura intensiva.*

Páginas Web

Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción

- <http://www.sencico.gob.pe>

Datos del IWECC (International Weather for Energy Calculation)

- <https://www.trane.com/Commercial/DesignAnalysis/Weather.aspx?i=>

Calefactor de latas

- <http://blog.hemmings.com/index.php/2007/04/26/almost-free-garage-heat-just-drink-a-lot-of-soda/#more-3769>

Calefactor de piedras y alambre

- <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2011/02/19/muro-trombe-fabricado-con-piedras-de-rio-y-alambre/>