RESUMEN:

Este proyecto final de carrera está enmarcado en el ámbito de apoyo de las energías renovables y eficiencia energética en el Perú, proyecto que se desarrolla gracias al CCD (UPC). El principal objetivo de este es pues la nueva construcción de una vivienda bio-sostenible, la cual mediante la energía solar sea capaz de gestionar el confort, la luz y el agua de la forma más eficiente posible y produciendo el menor impacto ambiental y social en la zona. Este nuevo diseño y construcción se va a realizar de forma totalmente dependiente (tanto geográfica como socialmente) en la comunidad campesina de Punacancha, perteneciente al distrito de San Sebastián, el cual a su vez pertenece a la provincia de Cusco (Perú).

Desde hace algunos años, la organización Guamán Poma de Ayala así como otras organizaciones no gubernamentales, el Instituto Agrario del Perú (I.A), han dedicado parte de sus recursos a la mejora sustancial de las condiciones de vida de las comunidades indígenas de la región. Este proyecto pretende ir un paso más adelante diseñando y construyendo una nueva vivienda (obra nueva) que, mediante la energía solar (radiación solar) gestione el confort y la calefacción, la luminosidad y el agua caliente, usando los recursos disponibles en la comunidad de Punacancha.

El diseño de esta vivienda contempla tres campos diferentes de investigación y estudio: estudio térmico y confort, estudio lumínico y un estudio para gestionar la obtención de agua caliente.

Posteriormente al diseño, se estudiaran mejoras tecnológicas que se adapten al proyecto (presupuesto, cultura) y se realizarán las comprobaciones pertinentes con la finalidad de cumplir con la viabilidad del proyecto. Al mismo tiempo que se elabora un estudio de los costes asociados al proyecto.

Seguidamente se realizará un estudio de impacto ambiental así como también del impacto social y cultural del proyecto (aspectos importantes teniendo en cuenta que se trata de un proyecto de cooperación con sociedades indígenas).

Por último, se describirán los objetivos y resultados obtenidos.

1. PREFACIO 7
1.1 ORIGEN DEL PROYECTO 7
1.2 MOTIVACIÓN 7
2. INTRODUCCIÓN 9
2.1 OBJETIVOS 9
2.1.1 OBJETIVOS GENERALES 9
2.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 9
2.2 ALCANCE 10
3. INTRODUCCIÓN AL ÁMBITO DE TRABAJO 11
3.1 POBLACIÓN 11
3.2 CARACTERÍSTICAS DEMOGRÁFICAS 11
3.3 CARACTERÍSTICAS SOCIOECONOMICAS 12
4. INTRODUCCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA 12
4.1 CONDICIONES ACTUALES 12
4.2 FACTORES QUE PRODUCEN ESTAS CONDICIONES 13
5. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN 15
5.1 ANTECEDENTES 15
5.1.1 GENERALES 15
5.1.2 ESPECÍFICOS 16
5.2 JUSTIFICACIÓN 17
6. RECOGIDA DE DATOS 17
6.1 SITUACIÓN DE PUNACANCHA 18
6.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS 20
6.3 COMPARACIÓN DE LOS DATOS 28
6.3.1 BASES DE DATOS 28

7. ESTUDIO LÚMINICO 30
7.1 INTRODUCCIÓN 30
7.1.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS BÁSICOS 30
7.1.2 CARACTERÍSTICAS LUMÍNICAS DE LA ZONA 31
7.2 DIFERENTES OPCIONES PARA EL MODELO 31
7.2.1 CLARABOYAS 31
7.2.2 DISTRIBUCIÓN DE LA VIVIENDA 32
7.2.3 OBJETOS DE ESTUDIO Y CONSIDERACIONES 33
7.3 RESULTADOS OBTENIDOS 37
7.3.1 NIVELES DE ILUMINACIÓN 37
7.3.2 CONTROL DE LA ILUMINACIÓN 39
7.3.3 AHORRO ENERGÉTICO 39
7.3.4 AHORRO ECONÓMICO 40
8. ESTUDIO TÉRMICO DE CALEFACCIÓN/CONFORT 41
8.1 INTRODUCCIÓN 41
8.1.1 CONDUCCIÓN 41
8.1.2 RADIACIÓN 42
8.1.3 CONVECCIÓN 42
8.1.4 TEMPERATURA DE CONFORT 43
8.2 CÁLCULO DE LAS GANANCIAS 43
8.2.1 CLARABOYAS 43
8.2.2 MURO INTERCAMBIADOR DE CALOR 45
8.3 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS 47
8.3.1 ELEMENTOS 48

8.4 RESULTADOS OBTENIDOS 70
8.4.1 BALANCE ENERGÉTICO DIARIO: SIMULACIÓN 70
8.4.2 RESULTADO FINAL 72
9. ESTUDIO DE AGUA CALIENTE Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS 74
9.1 ANTECEDENTES 74
9.2 PROPUESTA DEL NUEVO CALENTADOR 75
9.3 SISTEMA DEL CALENTAMIENTO 77
9.3.1 NECESIDAD DIARIA 77
9.3.2 ESPECIFICACIONES 78
9.3.3 DIMENSIONAMIENTO 79
9.4 ELABORACIÓN DEL MODELO 79
9.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES 79
9.4.2 MODELO FINAL 82
9.5 GESTIÓN DE LOS RESIDUOS 83
9.6 MEJORAS PROPUESTAS 84
10. DISEÑO FINAL DE LA VIVIENDA 84
10.1 VISTA EXTERIOR 84
10.2 VISTA INTERIOR 85
11. IMPACTO SOCIO-CULTURAL 86
12. IMPACTO AMBIENTAL 86
13. IMPACTO ECONOMICO 88
14. CONCLUSIONES 89
15. VALORACIÓN PERSONAL 90
16. AGRADECIMIENTOS 90
17. BIBLIOGRAFIA 91

1. PREFACIO :

1.1. ORIGEN DEL PROYECTO:

La idea de este proyecto nace del de la cooperación existente entre el CCD (UPC) y el centro Guamán Poma de Ayala, con sede en Cusco, llamado “Apoyo técnico a la investigación peruana en energías renovables y en eficiencia energética”. Este PFC pretende generar una guía para la construcción de una vivienda rural, digna, bio-sostenible y autosuficiente partiendo de este mismo proyecto y de otros proyectos de cooperación ya realizados.

1.2. MOTIVACIÓN:

La motivación surge de la necesidad existente en el intercambio de conocimientos, experiencias y técnicas entre instituciones de los países desarrollados y los países del hemisferio sur. Esta cooperación no solo institucional así como también personal permite la realización de estudios y proyectos en países en fases de crecimiento, desarrollo e integración y la contribución directa por parte del cooperante y de la Universidad Politécnica de Catalunya dentro de estos. Se debe destacar también la motivación personal al participar activamente en la creación de hogares para esta población lo cual a su misma vez, motiva a los beneficiarios a comprometerse en cada una de las etapas del mismo.

2. INTRODUCCIÓN:

2.1. OBJETIVOS:

2.1.1. OBJETIVOS GENERALES:

Mejorar las condiciones de habitabilidad y salud de las comunidades campesinas de la provincia del Cusco mediante la creación de un modelo estándar para la construcción de estas, que permita en otras comunidades reducir y simplificar el proceso y el tiempo de ejecución y elevar la calidad de vida de la población de este sector

2.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

a. Diseñar una vivienda digna y bio-sostenible en la comunidad de Punacancha, desglosada en tres planos de actuación: elaborar un sistema de iluminación eficiente que permita un ahorro energético y económico, diseñar un modelo que gestione el abastecimiento de agua caliente en la vivienda así como también la gestión de aguas residuales y por último la creación y control de un sistema de confort y calefacción en el interior del habitáculo.

b. Realizar actividades de capacitación para el correcto manejo y mantenimiento de la vivienda y sus sistemas y del medio ambiente.

Cabe destacar también, que los objetivos resaltados anteriormente (los generales y los específicos) se llevarán a cabo con la tecnología y los recursos tantos técnicos como culturales disponibles en la zona de implementación, puesto que se pretende que el modelo que se pueda usar en posteriores proyectos, es decir que sea un proyecto completamente replicable en comunidades vecinas.

2.2. ALCANCE:

i. Introducción al ámbito geográfico, cultural y social de la zona de trabajo.

ii. Identificación de la problemática:

Presentación de las condiciones actuales, de las causas que generan esta problemática y de las consecuencias que estás acarrean.

iii. Elaboración de un modelo lumínico para la vivienda:

Obtención de datos mediante mediciones, análisis de estos datos y estudio de las diversas opciones óptimas para la iluminación.

iv. Elaboración de un modelo de gestión de agua caliente y residuos:

Obtención de datos mediante información y mediciones en la zona, estudio de la información obtenida e introducción de mejoras para una gestión óptima.

v. Elaboración de un modelo térmico de confort:

Obtención de la información necesaria mediante mediciones en la zona, análisis de los datos obtenidos, aplicación del modelo ya existente para viviendas rurales con las mejoras necesarias.

vi. Diseño de la vivienda:

Modelización de la vivienda, estandarización del modelo y comprobación de la viabilidad de los modelos estudiados.

vii. Estudio de impacto social y cultural:

Impacto social y cultural provocado por la construcción de esta vivienda y de la tecnología usada así como aceptación y motivación de los beneficiaros.

viii. Estudio Impacto ambiental:

Impacto ambiental generado por el proyecto.

ix. Análisis económico de los costes del proyecto:
Financiación, coste de la ejecución.

3. INTRODUCCIÓN AL ÁMBITO DE TRABAJO:

3.1. POBLACIÓN:

La zona de Punacancha, en la actualidad, está habitada por un total de 355 personas, las cuales habitan de forma permanente en el sector y están organizados en un comité que les representa en las actividades que desarrollan. Cabe considerar también en este apartado los datos facilitados por el INEI sobre crecimiento poblacional en la comunidad, pues está presenta un crecimiento anual del 2'75% ajustándose totalmente a los datos de crecimiento anual que presenta el departamento del Cusco para comunidades rurales.

3.2. CARACTERÍSTICAS DEMOGRÁFICAS:

Esta comunidad se ubica en el distrito de San Sebastián, situado en el valle sur de Cusco. Particularmente, Punacancha se sitúa en la parte alta del valle, a una altitud media de 4000 msnm en una zona de topografía bastante accidentada donde se presentan fuertes variaciones en la pendiente del terreno, así como la presencia de cortantes con profundidades considerables. A continuación se muestra una imagen tomada por satélite dónde apreciar las diferentes alturas de la geografía peruana y más concretamente la zona comunal.

Imagen 1. Mapa de Altitud de la zona de estudio

En cuanto al núcleo principal de la población, está situado en una zona con pendientes que van des del 10% hasta el 15% como máximo. Esta característica influye directamente en la distribución de los edificios y si añadimos que en la zona no ha existido ningún plan de urbanización, no debe extrañar el hecho de que cada poblador haya habilitado su espacio individualmente mediante la autoconstrucción, haciendo sus propias instalaciones de servicios de forma precaria y sin criterio técnico. Esta mala gestión de los recursos e instalaciones genera, por ejemplo, que las aguas usadas sean expulsadas a las mismas calles o los cortantes colindantes por no existir desagües.

3.3. CARACTERÍSTICAS SOCIOECONOMICAS:

Las principales actividades económicas de los pobladores de esta comunidad se basan en: la agricultura de cereales y tubérculos y la ganadería a pequeña escala, productos que destacan por la incidencia directa sobre el mercado provincial de Cusco, que a menudo suele ser de las únicas (o la única) forma de obtener ingresos económicos por parte de los pobladores. En la mayoría de los casos, pues se trata de una agricultura y ganadería de autosuficiencia.

4. INTRODUCCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA:

4.1. CONDICIONES ACTUALES:

La comunidad campesina de Punacancha está situada en el denominado Valle sur, es decir, en plena sierra andina. Por esta razón se ve sujeta a condiciones climáticas extremas (debido en gran parte a la altitud que se sitúa), instalaciones primarias precarias pues disponen de un solo cable de electricidad el cual está expuesto a constantes subidas y bajadas de tensión (por no disponer de ningún tipo de transformador o controlador de tensión), inexistencia de subministro de gas natural ni gas butano para calentar la vivienda y mucho menos para calentar agua caliente (ya sea para cocinar o ducharse), existencia de cocinas de leña que se emplean tanto para cocinar como para calentar los distintos ambientes pero cuyos humos permanecen en

el interior de la vivienda por una mala gestión de la ventilación y sistema de iluminación y captación de luz natural prácticamente inexistente.

4.2. FACTORES QUE PRODUCEN ESTAS CONDICIONES:

i. Condiciones climáticas extremas:

Causas:

En la región de la Sierra Andina y a las alturas en las que se va a trabajar se distinguen dos estaciones muy marcadas: La seca y la húmeda. Ambas se caracterizan por tener una radiación solar muy alta durante el día, alcanzando temperaturas elevadas durante estas horas y una fuerte inversión térmica cuando cae la noche, llegando a temperaturas bajo cero en muchas ocasiones. Además en la época húmeda estas bajas temperaturas van acompañadas por fuertes lluvias que pueden persistir varios días.

Consecuencias:

Como resultado de estas condiciones, las construcciones presentan temperaturas por debajo del confort, así como humedades frecuentes que se traducen, lamentablemente, en la mayoría de los casos en enfermedades respiratorias (gripes y en algunos caos pulmonías) que afectan sobre todo a la población infantil de estas comunidades.

ii. Instalaciones primarias precarias:

Causas:

Al tratarse de una comunidad indígena apartada del núcleo de Cusco, las subvenciones, ayudas y proyectos no son prioritarios para el gobierno en esta zona. Debe añadirse también la compleja localización geográfica que dificulta a su vez las vías de comunicación con otros municipios e inclusive con núcleos urbanos de mayor tamaño.

Consecuencias:

Esta despreocupación del gobierno crece cada vez más pues estas zonas de la sierra Andina están cada vez más olvidadas y entran en fase de marginación al no ser contempladas por el gobierno. La falta de inyecciones económicas en la zona no permite crear, por ejemplo, una instalación eléctrica en condiciones para abastecer a la

comunidades, instalaciones que a su vez se ven truncadas además por las dificultades técnicas y falta de recursos de los habitantes, por no existir el intercambio de información entre localidades.

iii. Dificultad de suministros:

Causas:

Las difíciles comunicaciones por la morfología del terreno y la falta de vías de comunicación que convierten a estas zonas en prácticamente inaccesibles. Cabe destacar la situación económica de los pobladores que obtienen sus ingresos única y exclusivamente de los pequeños cultivos que les permite la topografía y de la ganadería a pequeña escala.

Consecuencias:

La no disponibilidad de combustibles fósiles (por las razones anteriores) hace imposible la obtención de agua caliente que, con las condiciones climáticas extremas anteriormente citadas, repercute en las condiciones higiénicas básicas de la población, que a menudo las olvida. Además, encomienda la calefacción de las viviendas a las cocinas de leña.

iv. Contaminación por mal uso de las cocinas de leña:

Causas:

La leña de especies vegetales nativas (como el eucalipto) es el combustible fósil al que tiene acceso la mayor parte de la población. Estas cocinas hacen a su vez la función de estufas en las viviendas, por lo que se diseñan con el mínimo número de aperturas posible para mantener el calor.

Consecuencias:

El mal diseño de las viviendas genera una recirculación del aire prácticamente nula. Los habitantes desarrollan enfermedades pulmonares graves como la fibrosis pulmonar, e incluso problemas cardíacos a edades tempranas debido a la inhalación del humo de la combustión.

v. Captación nula de luz natural:

Causas:

La autoconstrucción por parte de la población, así como las costumbres heredadas de la propia comunidad en cuanto a este tipo de construcción y la falta de transferencia de información técnica por parte de diferentes organismos conocedores de las técnicas de habitabilidad, provocan que la población aún crea fuertemente que las aperturas para captar luz natural son más un inconveniente (pues pueden enfriar el ambiente) que una ventaja.

Consecuencias:

La mala gestión constructiva provoca que los ambientes del habitáculo no dispongan de luz natural factor que dificulta notoriamente la vida en el interior y obliga a los inquilinos a depender de luz artificial (si lo permite la instalación y las caídas constantes de tensión en la red) y consecuentemente a los gastos económicos que esta requiere.

5. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN:

5.1. ANTECEDENTES:

5.1.1. GENERALES:

El Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala es una institución sin fines de lucro, que en sus 25 años ha conseguido el desarrollo local, por medio de la ejecución de actividades y obras que mejoran las condiciones de vida de las poblaciones urbanas rurales, mediando como facilitadores entre las autoridades y los pobladores.

Dentro del ámbito de trabajo de la institución se ha logrado actuar con los municipios integrantes del valle del Huatanay, constituidos por los distritos de San Sebastián, San Jerónimo, Saylla, Oropesa y Lucre, con quienes se está desarrollando el Plan Integral de desarrollo estratégico y sostenible del valle sur del Cusco (PIDES), instrumento que permite orientar adecuadamente los esfuerzos conjuntos de estos municipios para mejorar las condiciones de vida

de la población, con la implementación de acciones y obras priorizadas dentro del proceso.

En este proceso PIDES, se han constituido comisiones temáticas en medio ambiente, cultura e infraestructura urbana, las cuales, han formulado las prioridades y necesidades de cada distrito, siendo una de estas la del presente proyecto: La construcción nueva de una vivienda bio-sostenible, que mejorará las condiciones de vida de los beneficiarios y motivará a los demás comuneros a mejorar sus propias viviendas.

5.1.2. ESPECÍFICOS:

En el caso particular de Punacancha, puesto que no se dispone de un sistema de desagüe en el poblado, éste se ha visto permanentemente afectado por enfermedades gastrointestinales que afectan principalmente a la población infantil y en menor grado a todos sus habitantes.
Esto obliga a implementar un sistema de desagüe, ya que de lo contrario los sectores aledaños al poblado se convierten en focos de contaminación y enfermedades. Este proyecto se está llevando a cabo en la actualidad con exitosos resultados según nos muestran los siguientes indicadores:

a. 64 de las 71 familias que habitan en la comunidad disponen de un sistema de desagüe.

b. La totalidad de estas 64 familias ha instalado además, un biodigestor en el extremo del sistema de desagüe con la finalidad de gestionar los residuos sólidos producidos por los miembros de las familias.

c. Estos miembros han sido participes directos de la ejecución del proyecto, pues han recibido talleres de formación para aprender a usar las tecnologías y materiales de los que disponen en su comunidad.

d. Recientemente la comunidad ha aceptado la instalación de un biofiltro donde gestionar todos estos residuos para mantener la sostenibilidad de su territorio y preservar el medio ambiente.

5.2. JUSTIFICACIÓN:

Estudiando los factores, la problemática reside en la dificultad (económica y tecnológica) de los habitantes para acceder a una vivienda que disponga de condiciones básicas de habitabilidad y confort como son: sistema de agua caliente para mantener ciertas condiciones higiénicas básicas (puesto que por las temperaturas extremas que se dan en la zona, sin agua caliente resultan casi imposibles), reside también en disponer de una iluminación natural del interior de la vivienda para reducir el consumo de electricidad (gasto notorio para la economía de las familias) y en gestionar el confort/sistema de calefacción en las estancias (debido al clima extremo al que están expuestos).

Así pues por todo lo expuesto en párrafo anterior, es de necesidad urgente la implementación de este proyecto de construcción nueva que esté en acorde con las pretensiones de la comunidad.

6. RECOGIDA DE DATOS DE LA ZONA DE CONSTRUCCIÓN: VALIDACIÓN[1]

Los datos que a continuación se presentan han sido obtenidos mediante las mediciones que ha realizado la estación meteorológica Vantage Pro 2 (Davis Instruments).Esta estación de última generación juntamente con el software informático WeatherLink 5.7, permite realizar un análisis del comportamiento climático muy completo, que a su vez se va a traducir en un mejor conocimiento de la zona con la finalidad de dimensionar los elementos estructurales y tecnológicos que en cada uno de los estudios se plantean. Además, cabe destacar que se estandarizarán los estudios partiendo de un caso particular.

Se han realizado las mediciones durante el periodo comprendido entre los días 01/07/2010 y 26/07/2010.Se han escogido estos días por tratar-se del caso más

[1] ANEXO B

desfavorable, en cuanto a condiciones meteorológicas en la zona. En la sierra Andina, históricamente, se dan las condiciones más extremas en Julio.

6.1. SITUACIÓN DE PUNACANCHA, ZONA SOLAR, COORDENADAS. MAPA DE LA ZONA:

Punacancha está situada en el denominado valle Sur del Cusco y políticamente ligada al distrito de San Sebastián. Su situación exacta en cuanto a coordenadas cartesianas es la siguiente:

LATITUD: 13º 36’ 32’’ SUR
LONGITUD: 71º 54’ 48’’ OESTE

Su altitud promedio es de 4000 msnm, situando el punto más alto de la comunidad (2 construcciones) en los 4052msnm. Es de gran relevancia, además resaltar el desnivel agudo que presenta el territorio en estas coordenadas, puesto que está situado en la zona alta de una ladera.

Se pueden apreciar estas observaciones en el Anexo A y en el archivo fotográfico, así como en los mapas adjuntos.

A continuación se muestra el mapa solar del Perú dónde se puede apreciar la incidencia de la radiación solar sobre las distintas zonas del país:

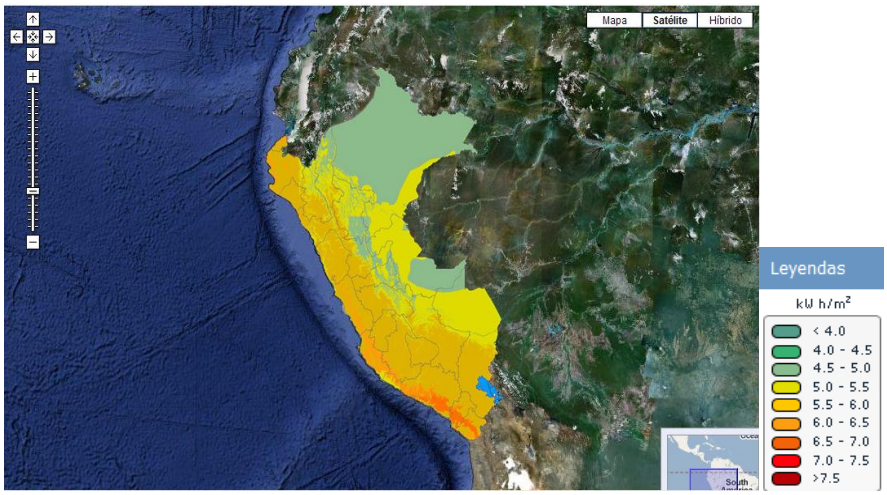

Imagen 2. Atlas Solar Perú (promedio anual)

La ilustración anterior corresponde al Atlas Solar del Perú. Más especificamente, se trata del promedio anula de radiación solar incidente sobre la superfície del país. Esta información sobre la radiación percibida sirve para

contrastar los datos obtenidos por la estación meteorologica y permitir de esa forma la validación de los datos antes de iniciar los cálculos pertinentes.

A continuación se muestra una imagen detallda de la zona d'estudio dónde se puede apreciar la radiación exacta, tanto la promediada anualmente como la focalizada al mes en el cual se ha recogido el mayor volumen de datos (Julio).

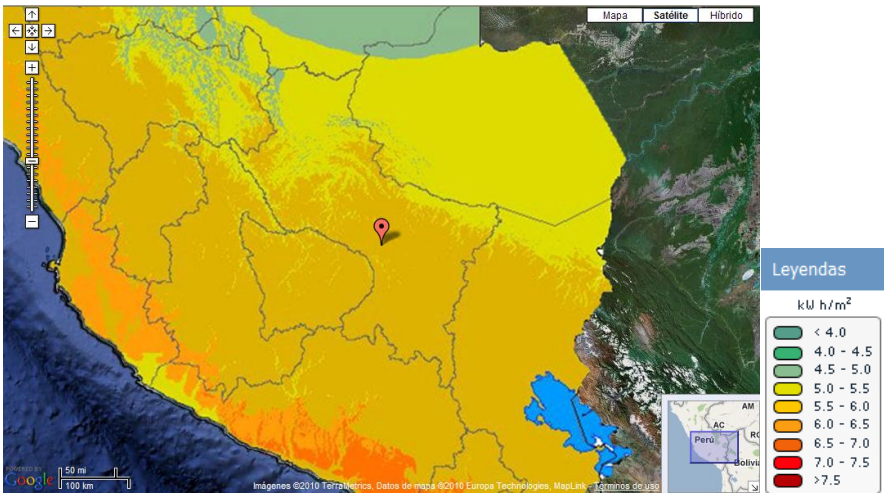

Imagen 3. Atlas Solar Punacancha (promedio anual)

A continuación se muestra también la imagen satelital de la zona comunal, dónde se aprecia la radiación solar durante el mes de Julio:

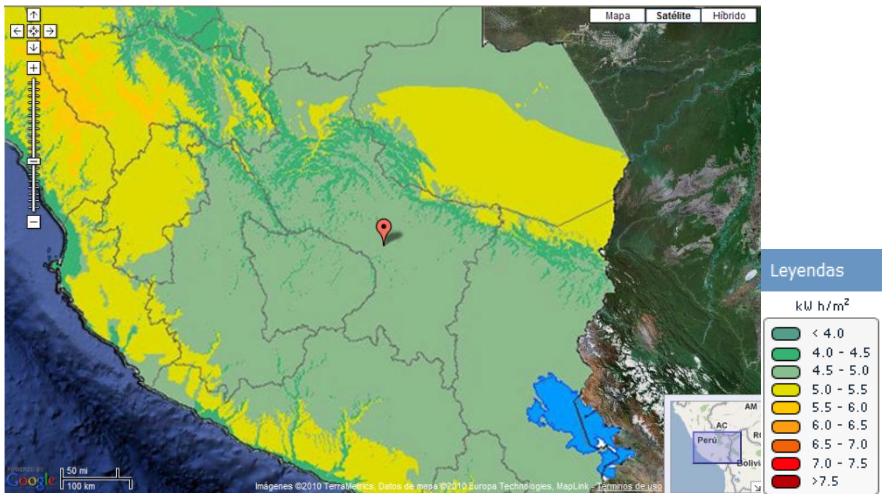

Imagen 4. Atlas Solar Punacancha (mes de Julio)

Como se puede apreciar en las imágenes anteriores, la radiación promedio anual y la del mes de Julio no coinciden, esto es debido a que la estación correspondiente al mes de Julio es invierno, En esta estación el sol se encuentra más alejado del hemisferio sur y por tanto, la radiación sobre el Perú y más concretamente sobre Punacancha es más débil.

Por otro lado en la imagen del promedio anual se han tenido en cuenta los meses de Enero y Febrero correspondientes a la estación estival, estación en la cual la radiación en la zona es máxima.
Cabe añadir además, que tal y como se puede apreciar en la imagen 4, la radiación solar durante el mes de Julio (el promedio de todos los días del mes) está en torno a los 4,5-5,0 kWh/m². Si se contrasta este dato con los obtenidos de las mediciones realizadas, se puede apreciar claramente que los datos obtenidos coinciden con los proporcionados por fuentes gubernamentales del Perú.

Radiación Atlas Solar: 4,5-5,0 kWh/m²
Radiación Solar Calculada[2]: 4,858726923 kWh/m²

Como se puede observar después de realizar el promedio de los datos captados por la estación, se obtiene un valor que queda comprendido en el intervalo marcado por la información térmica proporcionada por el satélite.
Este hecho hace pensar que, efectivamente, los datos con los que se trabajará son correctos en cuanto a radiación solar.

6.2. GRÁFICOS Y TABLAS: ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Para poder realizar los cálculos y dimensionamientos adecuados a cada uno de los estudios (lumínico, agua caliente y térmico) existen ciertas magnitudes relevantes, como pueden ser la temperatura, la presión atmosférica, el viento, la humedad, la propia radiación solar, que van a influir directamente en los cálculos. Por ese motivo, se requiere un pequeño análisis exploratorio de esos datos, con la finalidad de detectar datos erróneos, o posibles anomalías. A continuación se presentan, para cada una de las magnitudes anteriormente citadas, gráficos que permiten ver la evolución y el comportamiento durante el periodo de funcionamiento de la estación Vantage Pro 2.

[2] Se adjuntan los cálculos en el CD-ROM que se entrega con el proyecto.

i. Temperatura:

En referencia a la temperatura cabe destacar que va influir directamente en el estudio térmico de la vivienda así como también en el estudio de agua caliente (y posible dimensionamiento/construcción de la ducha solar). Se han tomado mediciones de la temperatura máxima y mínima diaria y se ha calculado la temperatura media, todo ello para intervalos de 10 minutos durante todo el día. Por la gran cantidad de datos que eso supone, se ha decidido trabajar con medias diarias con el fin de simplificar el cálculo sin perder demasiada precisión.

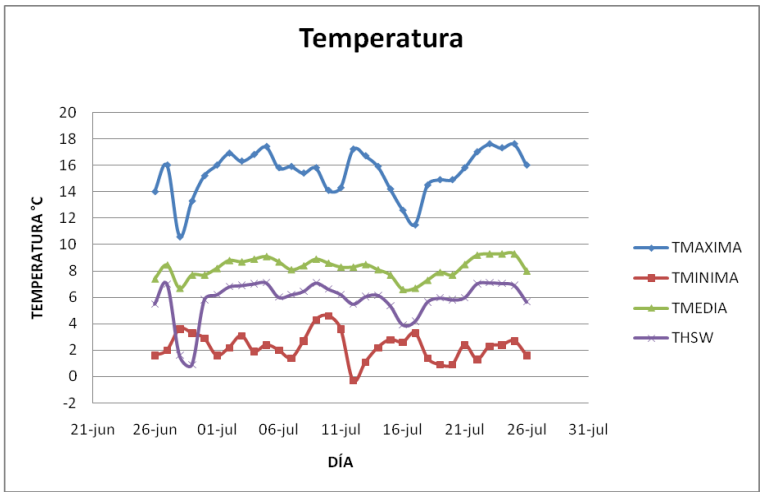

Gráfico 1. Temperatura

Como se puede apreciar existe una gran diferencia entre las máximas y las mínimas. Esto como ya se ha comentado anteriormente es un hecho característico del tipo de clima que en esta zona se experimenta. Esta diferencia puede llegar a alcanzar valores de hasta 20 unidades entre la máxima y la mínima en el mismo día (observar día 12/07 en el gráfico). Por otro lado, si se observa la temperatura media de todos se observa que se mantiene constante entre valores claramente pertenecientes a climas fríos (entre 7 y 9 °C). Por último resulta de gran importancia graficar el coeficiente THSW, la utilidad de este reside en que es una forma de calcular la sensación térmica mediante la ponderación de los factores que influyen directamente en ella. Estos son: La humedad (H), la propia temperatura (T), la radiación solar (S) y el viento (W). Realmente esta temperatura es la que perciben los habitantes de la zona ya que todas estas magnitudes son las que se perciben por los sentidos. En la evolución de esta magnitud se observa que esta

desplazada unos °C por debajo de la temperatura media, excepto en un caso que experimenta un gran descenso, esto es debido en que ese día se experimentó un descenso importante en alguno de los coeficientes que influyen en el cálculo.

ii. Viento (dirección, Vmedia):

La importancia del viento radica sobretodo en la influencia que tiene sobre el coeficiente THSW. Además, este viento es motivo del enfriamiento de las viviendas, puesto que estas no están bien selladas (en puertas y ventanas). Por tanto va influir en la orientación de la vivienda para tratar de no exponer ventanas ni puertas (en la medida de lo posible) en la dirección principal del viento.

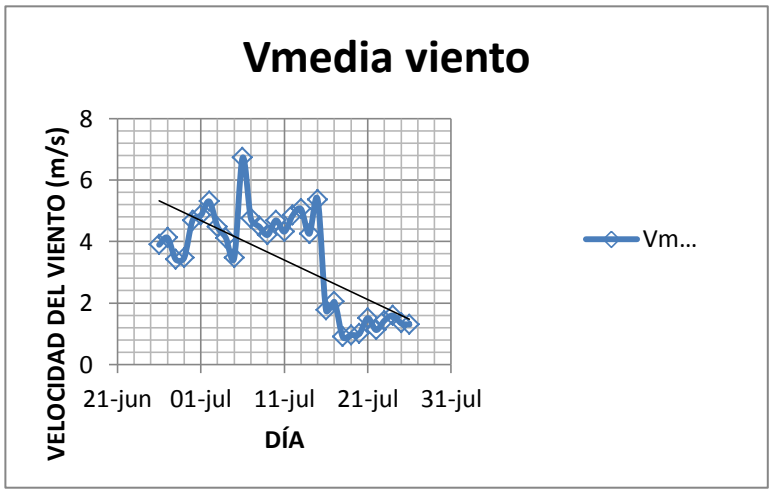

Gráfico 2. Velocidad del viento

Como muestra la tendencia lineal del gráfico, la velocidad del viento ha disminuido notoriamente des de inicios a finales del mes. Esta disminución tan grande (ha pasado de 5,37m/s el día 15/07 a 1,76m/s el día 16/07) supone un ciclo normal en la situación climatológica puesto que Junio suele ser uno de los meses con mas viento mientras en julio, agosto este tiene una intensidad muy baja. Tan importante como la velocidad del viento es la dirección de la cual este viene, pues es lo que marca si se tratan de vientos fríos o por lo contrario de vientos más cálidos, factor que nos condicionara la orientación principal de la vivienda.

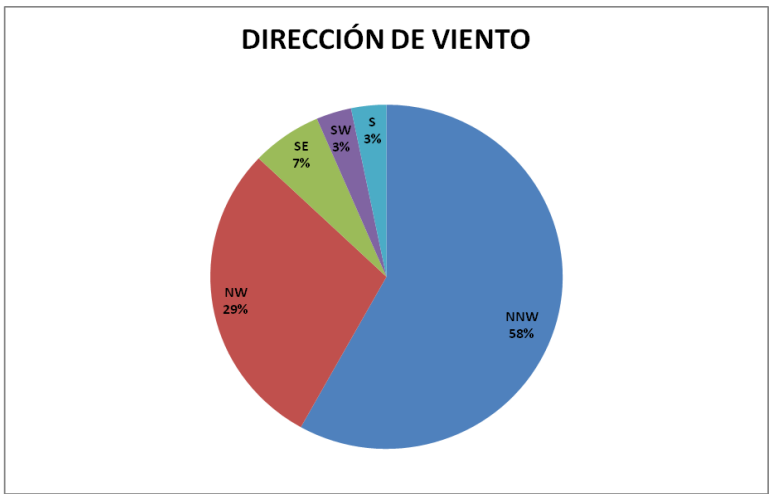

Gráfico 3. Dirección del viento

Durante el periodo de recogida de datos que ha constado de 31 días (teniendo en cuenta finales de Junio y prácticamente todo el mes de Julio), el resultado obtenido muestra que casi un 60% de esos días el viento ha sido de componente NNW. Este es un viento caracterizado por ser relativamente cálido pues no viene del sur (los vientos de esta última latitud son los que viene de parte baja del continente, que a su vez está más cerca del Polo Sur). Por otro lado el viento la componente Oeste de este viento proviene del interior y por tanto una humedad menor debido a que procede de los nevados Andinos. Así pues se debe tener presente que las aperturas de la vivienda (puertas, ventanas) no deben estar orientadas hacia esa dirección puesto que permitirán la entrada de aire dentro de la vivienda generando una distorsión en el control térmico del habitáculo.

iii. Humedad (humedad relativa):

La humedad de la zona está estrechamente ligada con el viento, concretamente con la dirección de la que este sople. Puesto que existe una gran diferencia, por ejemplo, si el viento proviene del este (la costa) que si sopla del oeste.

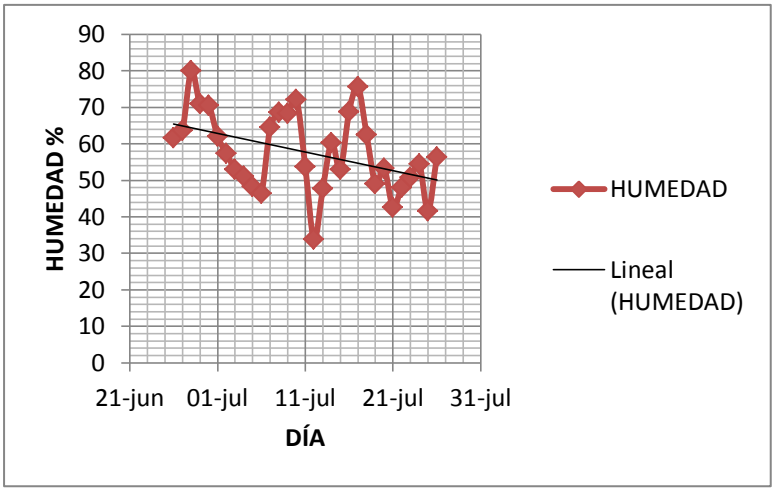

Gráfico 4. Humedad

En trazos generales si el viento sopla del oeste (como es en la mayoría de los casos), va a tratarse de un viento más seco, y por tanto va a arrastras menos humedad hacia la comunidad.

Como se puede ver, existe una relación dependiente entre la velocidad del viento en el día y la humedad en este, por esta relación, así como el viento presenta una tendencia decreciente des de mediados de mes, ocurre lo mismo con la humedad. Cabe destacar el descenso producido el día 12/07, esta es debida a que durante ese día el viento tuvo una componente SW y por tanto no arrastro casi humedad. Se ha considerado oportuno el considerar la humedad dentro del estudio por su influencia directa sobre el coeficiente térmico THSW.

iv. Radiación solar:

La radiación durante los meses de Junio y Julio, es relativamente baja puesto que corresponde al invierno en el hemisferio sur, Eso se traduce en que durante estos meses el Sol está más alejado de la superficie (en el hemisferio Sur) y por tanto la radiación es más suave.

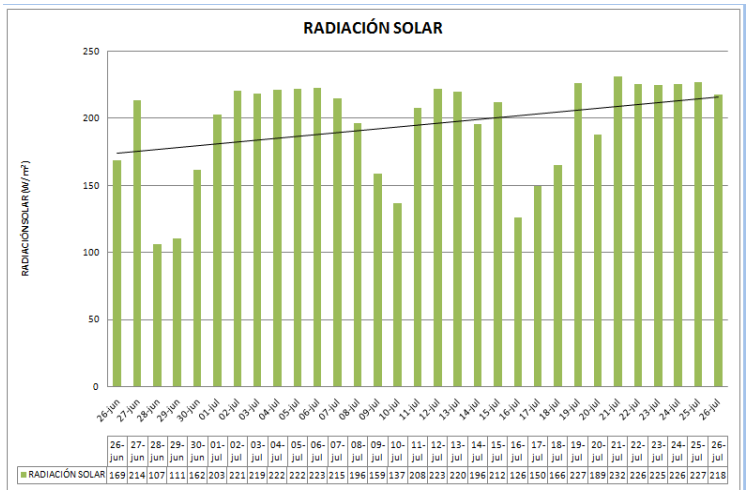

Gráfico 5 . Radiación Solar

Es de gran utilidad observar la tendencia lineal, debido a que a medida que avanzan los días avanza el invierno, lo cual significa que el sol se va acercando con el fin de la estación invernal. Estos valores de radiación solar son los acumulados durante un día, eso quiere decir que se contemplan tanto las horas de máxima radiación así como las horas nocturnas. Se ha decidido de esta forma puesto que lo relevante es, en realidad, la radiación que se haya podido acumular en esa superficie. Un ejemplo de esto sería, en el caso del estudio de agua caliente, saber con cuanta radiación se cuenta durante el día para que incida sobre la superficie de la ducha solar y caliente el agua.

v. Insolación Solar:

De gran importancia es la insolación solar en el estudio lumínico así como también en el estudio térmico, puesto que de ella se puede obtener el flujo radiante que va a permitir la obtención mediante cálculos del flujo luminoso. De esta forma se a calcular y comparar si la iluminación interna del habitáculo está dentro de los estándares y si es de un nivel suficiente para desarrollar las actividades que se llevan a cabo en el interior de una casa.

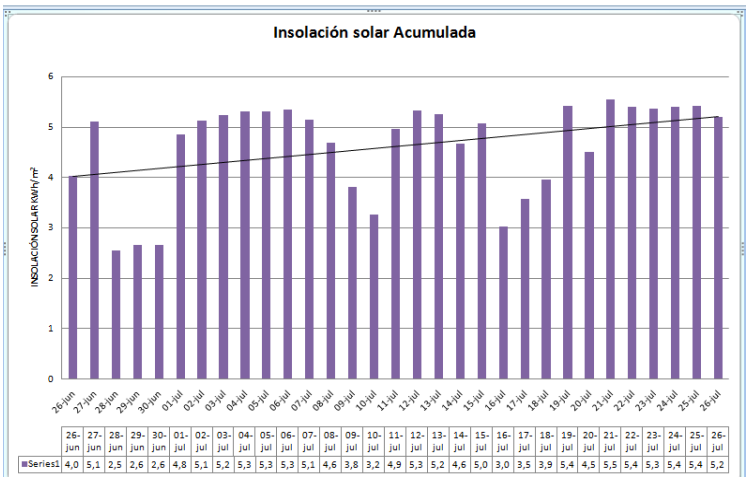

Gráfico 6. Insolación solar acumulada

La relación que existe entre la radiación solar i la insolación solar queda reflejada en comparar este gráfico con el anterior. Se aprecia que la tendencia que nos marca la progresión lineal es la misma. Puesto que a medida que avanzan los días del mes de Julio, aumenta la insolación solar. Se ha graficado el total acumulado por día debido a que los datos de los que se dispone para contrastar la información son datos diarios acumulados.

vi. Orientación solar:

En este apartado se debe tener en cuenta la latitud a la que se encuentra la comunidad, puesto que ese dato es el que va a determinar el diagrama solar de la zona, diagrama que a su vez va a indicar el comportamiento del sol en las distintas horas del día.

LATITUD: 13º 36’ 32’’ SUR

LONGITUD: 71º 54’ 48’’ OESTE

Es de gran importancia graficar la trayectoria solar en estas coordenadas con el fin de determinar el ángulo de incidencia sobre la comunidad. Esto va a permitir una mayor rigurosidad en los cálculos y consecuentemente una mayor exactitud.

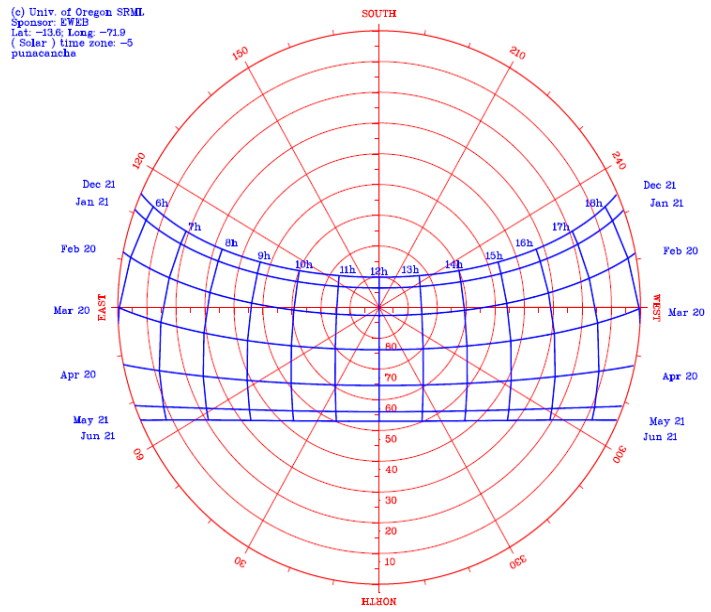

Imagen 5. Orientación solar

Sobre el plano, se puede observar la trayectoria del sol en cada uno de los meses del año, así como también la hora de la salida y de la puesta del sol. Cabe destacar que la trayectoria del sol cambia en función de la estación/mes, pues en el mes de estudio (invierno) se trata de un sol orientado claramente al norte, mientras que en verano es un sol ligeramente inclinado hacia el sur. Este factor se debe tener en cuenta en la orientación del tejado y ventanas de la vivienda, pues si se orientara la construcción al sur se estaría desaprovechando una gran cantidad de energía. Debido a ese factor y al ya anteriormente resaltado en cuanto a que el sol no llega a ser nunca un sol de sur sino más bien centrado y hacia el norte, no se debe usar la orientación sur para el tejado ni ventanas, pues la energía solar percibida seria mínima.

Se han calculado los distintos ángulos solares (h=altura solar, A=azimut solar) para cada hora comprendida entre el intervalo de las 06:00 y las 18:00, con el objetivo de determinar la inclinación óptima que debe presentar el tejado de la vivienda para poder recibir la máxima radiación solar y consecuentemente obtener un mayor rendimiento energético. Los cálculos se presentan en el Anexo C

6.3. COMPARACIÓN DE LOS DATOS CON LOS DE LA REGIÓN.

Los datos recogidos por la estación se han contrastado con la información que se posee de la zona en los mapas de radiación solar que facilita la NASA mediante Google. A pesar de esto, se ha considerado interesante contrastar los datos medidos con los datos que se obtienen de las bases de datos de programas como Censol 5, sobre la región del Cusco (a la que pertenece Punacancha), así como también con los datos obtenidos mediante mapas radiantes de la zona.

6.3.1. Bases de Datos de los programas de simulación Solar:

a. Censol 5.0:

El software Censol, que actualiza su base de datos a través de internet, presenta la última actualización de los datos sobre la zona del Cusco en 2008, y estos son los datos de radiación y energía solar para cada uno de los meses:

Enero	**Febrero**	**Marzo**	**Abril**	**Mayo**	**Junio**
18,7	16,9	17,7	18,1	17,3	17,2
5,2	4,7	4,9	5	4,8	4,8
Julio	**Agosto**	**Septiembre**	**Octubre**	**Noviembre**	**Diciembre**
18,1	18,4	18,6	20,3	20,7	18,8
5,1	5,1	5,3	5,6	5,8	5,2

Radiación Solar (MJ/m²·mes)
Insolación Solar (kWh/m²·mes)

Tabla 1. Radiación e Insolación mensual

Observando los datos para el mes de Julio y contrastándolos con los de la estación, se aprecia que:

Radiación Solar (Censol) = 18.1 MJ/m²·mes

Radiación Solar (estación)[3] = 17.54 MJ/m²·mes

Aunque, inicialmente, puede parecer que existe una diferencia significativa entre los dos valores, cabe resaltar el hecho de

[3] Calculo realizado en el anexo C

que existe una variación de altura entre Punacancha y Cusco de 400 metros (a pesar de estar la primera incluida en el territorio) considerando lo anterior, se obtiene solo una diferencia del 3% en cuanto a la radiación del 2008 y la del 2010.

b. Insolación solar de la zona:

Insolación Solar (Censol) = 5.1 kWh/m²·mes
Insolación Solar (estación) [2] = 4.85 kWh/m²·mes

La diferencia entre ambas medidas es del 5% y aceptable para validar los datos de la región, pues las diferencias son pequeñas y se ve que la tendencia es la misma con el paso de los años. A continuación se muestra de forma gráfica lo anteriormente comentado:

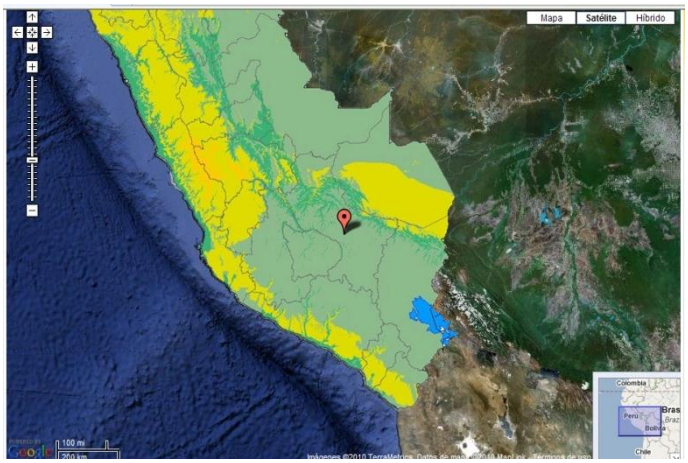

Imagen 6. Radiación Cusco Julio

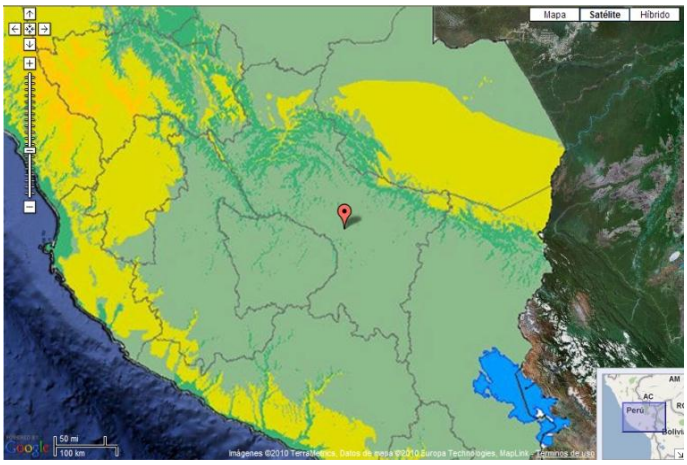

Imagen 7. Radiación Punacancha Julio

Se aprecia en la imagen que las radiaciones de la zona son iguales.

7. ESTUDIO LÚMINICO:

7.1. INTRODUCCIÓN (ILUMINACIÓN, MAGNITUDES, FORMULAS)

7.1.1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS BÁSICOS:

ILUMINACIÓN: Se conoce como iluminación a la acción de producir/conseguir ciertos efectos luminosos mediante un haz de luz, con el fin de conseguir un nivel de **iluminancia** adecuado según el uso de ese espacio.

- *Iluminación natural:* El concepto de iluminación natural es exactamente el mismo que el anteriormente citado con el único matiz importante de que el haz de luz proviene de una fuente de luz natural como puede ser el sol.

ILUMINANCIA: Se conoce como iluminancia a la cantidad de **flujo luminoso** que incide sobre una superficie. La unidad que se utiliza para medirla es el Lux = 1 Lumen/m², y se puede calcular según la siguiente expresión:

$$E = \frac{dF}{dS} \text{ (expresión diferencial)} \qquad \text{(EC 7.1)}$$

Dónde:

E: iluminancia [*lx*]

dF: diferencial de flujo luminoso [*lm*]

dS: diferencial de superficie [m^2]

Así, para un instante dado la expresión se puede simplificar, obteniendo:

$$E = \frac{F}{S} \qquad \text{(EC 7.2)}$$

FLUJO LUMINOSO: Se entiende como flujo luminoso a la potencia percibida. Su unidad en el sistema internacional es el lumen, que se obtiene de: 1 lm = 1 cd·sr

El flujo luminoso se calcula como la suma de todas las potencias del espectro visible per el ojo humano.

$$F = \int_{\lambda \text{visible}} Pot. \qquad \text{(EC 7.3)}$$

ENERGIA LUMINOSA: energía lumínica o luminosa es la energía fracción percibida de la energía transportada por la luz. Se denota con la letra Qv y se mide en lumen·segundo, es decir, se puede calcular a través de la expresión:

$$Qv = F \cdot t \qquad \text{(EC 7.5)}$$

Dónde:

F: es el flujo luminoso (potencia) [*lm*]

t: Intervalo de tiempo [*s*]

7.1.2. CARACTERÍSTICAS LUMÍNICAS DE LA ZONA:

Punacancha está situada a 4000 metros sobre el nivel del mar. En estas condiciones de altura, la radiación solar incidente así como la insolación solar, son muy intensas y por tanto la cantidad de luz en un día claro y soleado es muy significativa. Con el fin de estandarizar los cálculos se ha decidido trabajar con un día tipo en el mes de Julio, cuyos datos (por cada hora) han sido obtenidos mediante la media, en esa misma hora, de todos los días del mes.

7.2. DIFERENTES OPCIONES PARA EL MODELO:

7.2.1. CLARABOYAS:

En cuanto a estos elementos estructurales, son aquellas ventanas que se instalan en el mismo techo de la vivienda. Estas estructuras pueden estar fabricadas en varios materiales como pueden ser, el vidrio o distintos tipos de materiales poliméricos. En este caso se ha decidido realizar los cálculos del comportamiento lumínico para claraboyas construidas en policarbonato. Esta decisión se justifica mediante el buen comportamiento que este material presenta enfrente a factores meteorológicos adversos como el granizo, la lluvia e incluso la nieve. A continuación se presentan las opciones de estudio con sus características:

a. Claraboya Simple: Está constituida por un placa de policarbonato de 6mm de espesor. Se considera un área efectiva de la claraboya de 1.5m² por donde ingresa la radiación solar en forma de luz.

b. Claraboya Doble: A diferencia de la anterior, este elemento estructural está constituido por dos placas de policarbonato de 6mm de espesor con una cámara de aire entre medio de 3 cm de espesor. Se ha considerado ese espesor debido a que partir de ese valor, la cámara de aire aumenta su rendimiento térmico disminuyendo las pérdidas.

A continuación se presenta una tabla con las especificaciones técnicas de los dos modelos de claraboyas estudiados:

CLARABOYAS	MATERIAL	Grosor
	Policarbonato alveolar	6mm
SIMPLE		
color	incoloro	blanco opal
Transmitancia de luz visible (%)	82	58
Transmitancia rad. Solar (%)	86	76
DOBLE		
color	incoloro	blanco opal
Transmitancia de luz visible (%)	82	58
Transmitancia rad. Solar (%)	86	76

Tabla 2. Tipo de claraboya

Como se puede observar, no existen diferencias en cuanto al factor de transmisión de Luz al interior de la vivienda, lo cual se traduce en un comportamiento lumínico idéntico de las claraboyas.

7.2.2. DISTRIBUCIÓN DE LA VIVIENDA:

Para la realización de los cálculos y teniendo en cuenta la experiencia acumulada en las salidas técnicas a la comunidad de Punacancha (dónde se han visitado las viviendas de posibles beneficiarios) se ha considerado una construcción con la siguiente estructura y medidas:

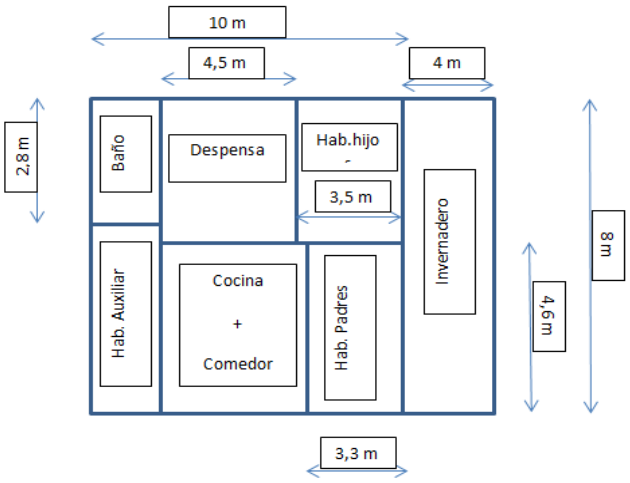

Imagen 8. Distribución vivienda

Como se puede apreciar la distribución de los ambientes consta de:

- Comedor + Cocina
- Baño
- Habitación Padres
- Habitación Hijos
- Habitación Extra
- Despensa

Las medidas de cada uno de estos espacios se han estimado según medidas efectuadas en viviendas de la comunidad. Es importante resaltar el hecho de que la vivienda nueva no se puede alejar de los diseños realizados por los pobladores, puesto que existe una componente cultural muy arraigada y difícil de modificar, por esa razón, la distribución queda fijada culturalmente.

7.2.3. OBJETOS DE ESTUDIO Y CONSIDERACIONES:

a. Consideraciones Previas:

La magnitud a partir de la cual se han calculado la información necesaria ha sido la radiación solar incidente media por la estación. Esta radiación es medida para una inclinación de 0°, es decir es la radiación normal a la superficie de la tierra.

Por ese motivo no se debe usar esa radiación para los cálculos de elementos estructurales ubicados en los tejados, debido a que estos presentan una inclinación de varios grados con respecto al suelo. En la sierra Andina la inclinación mínima, estructuralmente hablando, debe ser de 22.5° respecto a la horizontal. Esto es debido a las nevadas y granizadas que azotan esta zona y su finalidad es la de evitar la acumulación de nieve y granizo para evitar sobrepesos en el techo. Así pues teniendo en cuenta este factor relevante se ha calculado la radiación incidente para distintas inclinaciones del tejado. A continuación se muestran los resultados obtenidos[4]:

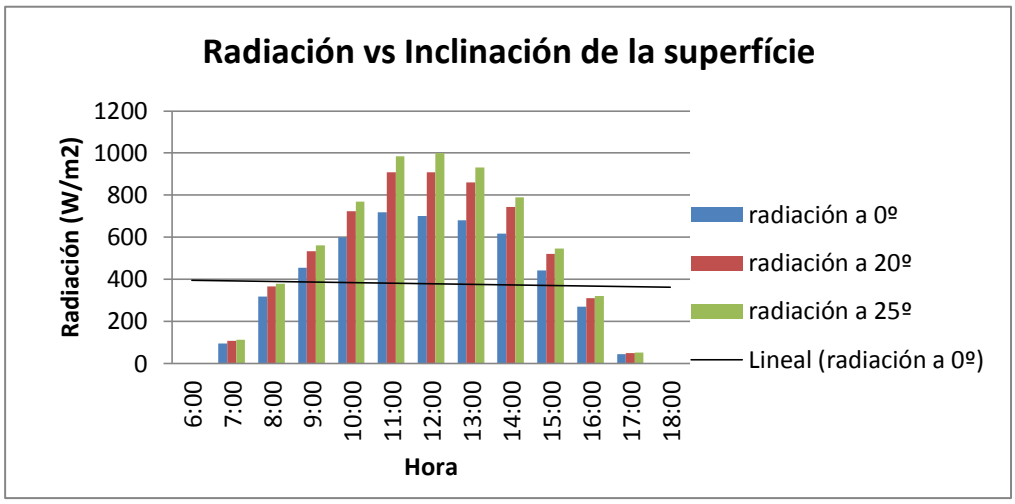

Gráfico 7. Radiación según inclinación del tejado

Como se puede apreciar en el gráfico, la radiación a 25° es la óptima (energéticamente) respecto a las demás, este factor sumado al hecho de que con esa inclinación se cumple la normativa arquitectónica de la zona, hace que se haya escogido esta radiación para todos los cálculos (lumínico-térmicos) de los elementos estructurales situados en el tejado de la construcción. Así pues todos los cálculos se van a realizar cogiendo como magnitud base la radiación solar incidente sobre una superficie de 25°.

[4] Cálculos realizados con el programa de simulación PVsyst.(ANEXO C)

Por otro lado, se ha escogido como criterios de Iluminación de viviendas y ambientes, los presentes en la normativa peruana de Arquitectura y Acondicionamiento de la Vivienda[5]. En esta guía se presentan, entre otros, las especificaciones lumínicas de que debe tener cada uno de los ambientes en función de la superficie y el uso que se le va a dar. Con estos parámetros como base, se estudiará el cumplimiento de la normativa usando, solamente, la iluminación solar.

Ambiente	**habitación padres**	**habitación hijos**
nº puntos de luz	2	1
Superficie (m²)	15	12
lux necesarios (según tablas)	150	150
lúmenes necesarios	2250	1800
equivalente en luz incandescente (W)	206,8014706	165,4411765
bombillas por punto de luz	3,446691176	2,757352941
bombillas incandescentes teóricas	4	3
bombillas incandescentes reales	1	1

habitación extra	**cocina+comedor**	**baño**	**Despensa**
1	2	1	1
12	21	6	12
150	300	150	150
1800	6300	900	1800
165,4411765	579,0441176	82,72058824	165,4411765
2,757352941	9,650735294	1,378676471	2,757352941
3	10	2	3
0	2	0	1

Tabla 3. Necesidades lumínicas por ambiente

Se ha estimado necesario también, calcular el equivalente en puntos de luz (con bombillas incandescentes) para más tarde, poder determinar el ahorro energético que supone la instalación de tragaluces en forma de claraboyas. Por último, se especifican las bombillas necesarias para conseguir la iluminación tabulada y se contrasta con las bombillas de las que realmente se dispone en cada habitación (por los escasos medios de la familia).

[5] Dato extraído de la guía técnica de iluminación eficiente.

b. Magnitudes y Cálculos:

El estudio lumínico se basa en determinar si la cantidad de luz ingresada a través de estos dispositivos durante las horas de luz solar puede suplir la iluminación artificial que actualmente se está usando en las viviendas rurales y de esta forma, conseguir un ahorro energético y económico en las familias así como también una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera. Se han estudiado los dos parámetros más relevantes en cuanto a la iluminación de una vivienda y sus ambientes, estos son:

Iluminancia:

Para este cálculo se ha usado la siguiente expresión a partir de la radiación solar:

$$I = Rad.Solar \cdot a \qquad \text{(EC 7.6)}$$

Este factor de conversión de unidades se usa en el diseño de viviendas solares y se traduce en: Cada Vatio de radiación solar, equivale a 93 Lúmenes de Iluminación solar. De esta forma se obtiene la iluminancia existente por m².

- a: Constante de transformación de radiación solar a Iluminación solar [*93 lm = 1 W solar*]
- $Rad.Solar$: Radiación solar incidente [$W \cdot m^{-2}$]
- I: Iluminancia [*lx*]

Cantidad de Luz (flujo luminoso):

Para este cálculo se ha usado la siguiente expresión, teniendo en cuenta el área efectiva de la claraboya.

$$C.L = I \cdot S \qquad \text{(EC 7.8)}$$

- I: Iluminancia [*lx*]
- S: Superficie útil de la claraboya [m^2]

- $C.L$: Flujo luminoso [lm]

7.3. RESULTADOS OBTENIDOS:

7.3.1. NIVELES DE ILUMINACIÓN:

A continuación se muestran los nivele de iluminación conseguidos en cada uno de los ambientes anteriormente mencionados.

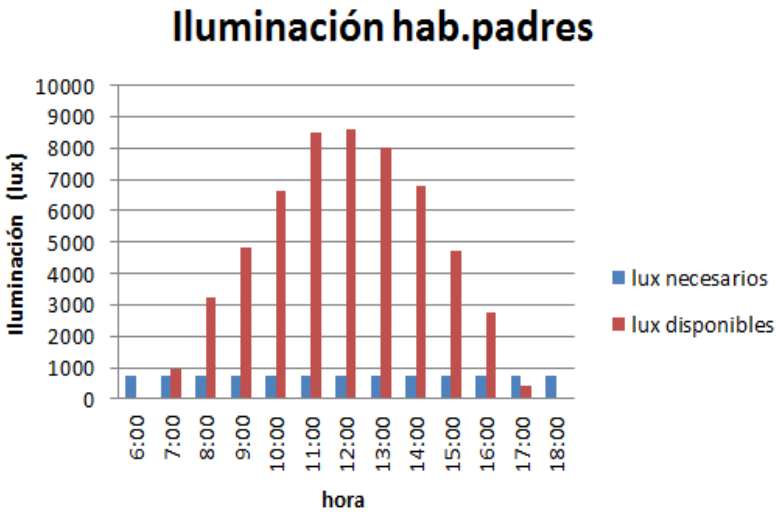

Gráfico 8. Cantidad luz habitación padres

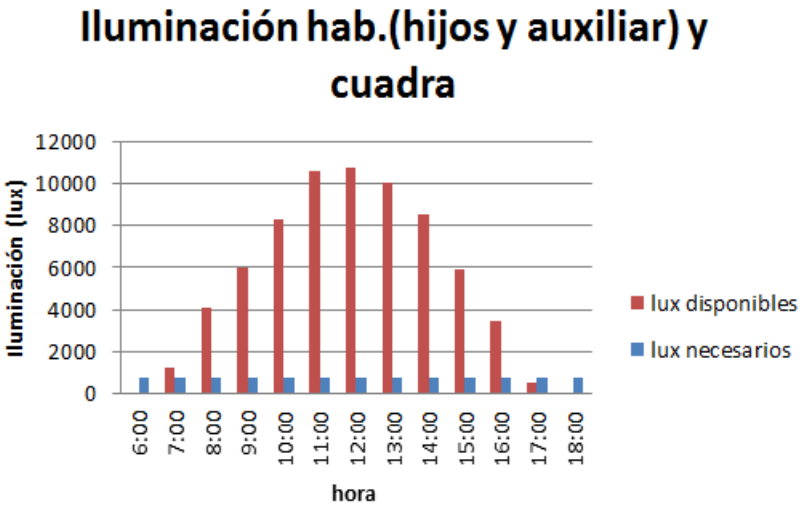

Gráfico 9. Cantidad luz habitación hijos, auxiliar y despensa

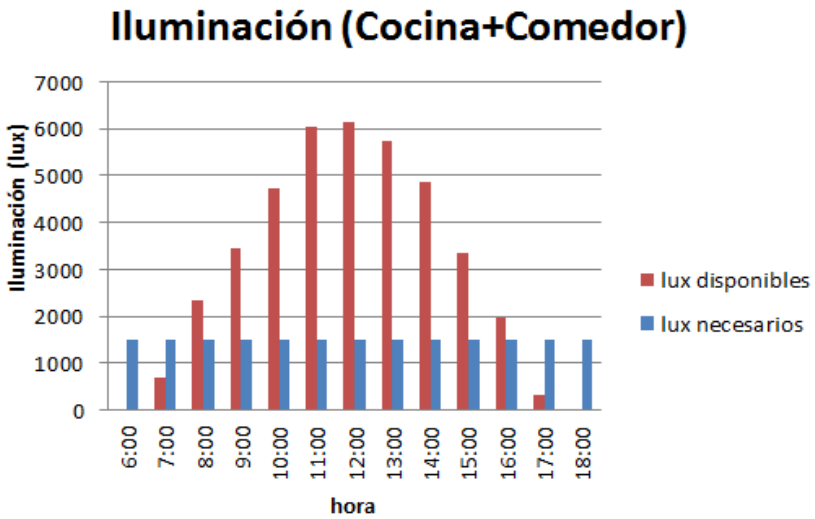

Gráfico 10. Cantidad luz cocina y comedor

En cuanto a los resultados obtenidos, cabe resaltar que, prácticamente en todas las horas que se dispone de radiación solar, se satisface la normativa con bastante margen. Es importante comentar que en el caso de la cocina + comedor, a las 17:00 horas, el nivel de iluminación requerida supera al nivel disponible, a priori esto se puede interpretar como un déficit, puesto que se ha considerado solamente el ingreso de luz a través de las claraboyas. En este caso, ese déficit de lúmenes se podría eliminar con la apertura de una ventana, ya que con esa medida se superaría el nivel deseado. En el resto de los ambientes no se descartan la instalación de algunas ventanas (para renovar el aire de la vivienda y así poder limpiarlo), que ayudaran aún más en el ingreso de luz al interior. El hecho de que se haya decido realizar el estudio sin contemplar las ventanas ha sido por el siguiente motivo: Se ha considerado que si se sobrepasaban los niveles requeridos solamente con las la instalación de las claraboyas (peor de los casos), seguro que se cumpliría la normativa si además se añadían ventanas, de esta forma, además, se han simplificado los cálculos.

7.3.2. CONTROL DE LA ILUMINACIÓN:

Referente al control del ingreso de luz, aparece un factor cultural externo que debe estar presente el diseño. Como ya se ha comentado anteriormente, en las comunidades andinas, existe todavía una negativa muy fuerte al uso de nuevas tecnologías. Por ese motivo las construcciones vigentes no presentan prácticamente aperturas al exterior por un temor a que ingrese frío o se puedan producir hurtos en la vivienda. Debido a este factor la gente que habita en estas viviendas está acostumbrada a desarrollar sus actividades con niveles de iluminación muy bajos y a menudo inexistentes. Después de llegar a cabo varias sesiones de concienciación y educación a la población de la comunidad, se ha conseguido aceptación y entendimiento, por parte de los participantes, referente al uso de algunas tecnologías que mejoren su calidad de vida. Aun así se ha considerado oportuno la instalación de unas cubiertas rígidas y opacas que controlen el ingreso de luz.

7.3.3. AHORRO ENERGÉTICO:

Con las medidas propuestas anteriormente se consigue un ahorro energético que se calcula, teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

Ambiente	**Tiempo funcionamiento durante el día [*h*]**	**Potencia por ambiente [*W*]**
habitación padres	4	60
habitación hijos	4	60
habitación extra	*	0
cocina+comedor	6	120
baño	2	0
Despensa	2	60

La energía eléctrica consumida se obtiene de la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{Eelec_{día} = Pele_{día} \cdot t}$$

- $\boldsymbol{Pele_{día}}$: Potencia de la bombilla/s por ambiente [*W*]
- $\boldsymbol{t}$: tiempo de funcionamiento medio por día [*h*]

La energía consumida en un día es:

Ambiente	**Energía eléctrica** $[Wh]$
habitación padres	240
habitación hijos	240
habitación extra	0
cocina+comedor	720
baño	0
cuadra	120
	1320

Esto se traduce en un consumo anual de:

$$\boldsymbol{Eele_anual} = \boldsymbol{Eele_día} \cdot \mathbf{365}\ \boldsymbol{días} = 0{,}1320\ kWh \cdot 365\ días = \mathbf{481{,}8}\ \boldsymbol{kWh/año}$$

7.3.4. AHORRO ECONÓMICO:

Teniendo en cuenta los resultados anteriormente calculados y sabiendo que el coste del kWh de energía eléctrica es de 0.4525 Nuevos Soles, se obtiene:

$$\boldsymbol{Ahorro_anual} = \boldsymbol{Eele_anual} \cdot \boldsymbol{Coste_kWh}$$

$$481{,}8\ kWh/año \cdot 0.4525\ N.Soles/\ kWh = \mathbf{218{,}0145}\boldsymbol{N.Soles/Año}$$

Con el cambio actual de divisas entre en Euro y el Nuevo Sol, se obtiene un total de:

$$218{,}0145 N.Soles/Año \cdot 1/3.60 = \mathbf{60{,}56}\ \boldsymbol{Euros/año}$$

Se debe resaltar que los ingresos de los comuneros en raras ocasiones superan los 80 euros al mes, por ese motivo se trata de un ahorro muy significativo para la economía de estos.

8. ESTUDIO TÉRMICO DE CALEFACCIÓN/CONFORT:

Se ha optado por dividir el estudio térmico en tres partes muy diferenciadas entre sí. Esta división consta:

i. Una primera parte dónde se estudia el ingreso de calor por los distintos elementos estructurales.
ii. Una segunda parte dónde se estudian las pérdidas de calor de los elementos estructurales.
iii. La parte final, dónde se estudian posibles mejoras del diseño para obtener un mayor rendimiento térmico (optimizar los elementos para mejorar los resultados).

8.1. INTRODUCCIÓN (MAGNITUDES, FÓRMULAS)

Se entiende como Transferencia de Calor al intercambio de calor que se produce entre dos cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas, creándose un flujo del cuerpo caliente hacía el cuerpo frío. Existen varios mecanismos de transmisión de ese calor, según las condiciones en que se encuentran los cuerpos.

8.1.1. CONDUCCIÓN:

La conducción de calor es la transferencia de energía de las moléculas o átomos más energéticos hacía las moléculas o átomos adyacentes menos energéticos, debido a la interacción de las mismas por el simple contacto directo.

Esta transferencia se produce, mayoritariamente por choque elástico en los fluidos, por difusión libre en el caso de los metales y por ondas reticulares en el caso de los materiales aislantes.

Se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$\frac{q}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

(EC 8.1)

- A: Área de conducción $[m^2]$
- Λ: Conductividad térmica $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

8.1.2. RADIACIÓN:

La radiación consiste en la transferencia de calor entre dos cuerpos a través de las ondas electromagnéticas que estos emiten. Cualquier cuerpo a 0 K emite radiaciones electromagnéticas, esas radiaciones den forma de onda electromagnéticas presentan longitudes de onda de entre 0,1 a 100 µm.

8.1.3. CONVECCIÓN:

La transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos simultáneos, la difusión o conducción del calor a nivel molecular y el movimiento global o macroscópico. Si T0>T∞ en la superficie del sólido en la interface, entonces se tienen moléculas con un nivel energético medio mayor a la del fluido que le rodea.

- Ley de enfriamiento de Newton:

En la transferencia de calor por convección, tiene un peso muy relevante la Ley del enfriamiento ideada por Newton. En esta expresión, Newton, comprobó que la potencia transferida en la interface entre un sólido y un fluido era proporcional a la superficie (A) expuesta y a la diferencia de temperaturas entre esa superficie y el fluido. La citada ley de Newton es:

$$qconv = hc \cdot A \cdot (T_0 - T_\infty) \qquad \text{(EC 8.2)}$$

- A: Área expuesta $[m^2]$
- hc: Coeficiente de convección $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
- T_0 : Temperatura de la superficie $[K]$
- T_∞: Temperatura del fluido $[K]$

Se han considerado los siguientes valores para los coeficientes de convección interior y exterior respectivamente:

$$hint = 5\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$
$$hext = 25\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

8.1.4. TEMPERATURA DE CONFORT:

Se ha optado por fijar una temperatura de confort en el interior de la vivienda como objetivo a lograr en el estudio térmico. Se han barajado distintos valores para esta temperatura de confort, puesto que en función de la humedad de la zona, la radiación solar, el viento y otros factores influyen en la sensación térmica de los individuos. Así pues se ha decidida establecer esta valor en 20°C. Aunque primeramente pueda parecer una temperatura un tanto elevada, se ha optado por estudiar el comportamiento de la vivienda cuando la diferencia entre temperatura exterior e interior es significativa, de este modo, si se satisfacen los parámetros térmicos y se cumple el confort, se podrá garantizar el funcionamiento de estos para temperaturas de confort inferiores.

8.2. CÁLCULO DE LAS GANANCIAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES:

Estas ganancias se pueden llevar a cabo por radiación directa incidente (en el caso de las claraboyas), por el intercambio de calor entre dos locales adosados como podría ser en el caso del muro Trombe. Así pues, se estudiaré el ingreso de calor al interior según los elementos estructurales.

8.2.1. CLARABOYAS:

En el caso de las claraboyas se han contemplado, al igual que en el estudio lumínico, dos tipos:

- Claraboya Simple de Policarbonato
- Claraboya Doble con cámara de aire de Policarbonato

Tanto en caso como en el otro, se ha calculado el ingreso de calor teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha tomado un área efectiva de la claraboya de 1,5 m^2
- Al tratarse de claraboyas instaladas en el tejado de la vivienda, se ha considerado una inclinación de este de 25°
- Se ha usado, por lo tanto, la radiación solar incidente para 25°
- Se supone que una claraboya puede estar orientada al este o al oeste, por lo tanto percibirá un % del total de radiación diurna.

La expresión usada para el ingreso de calor es:

$$Qrad = \alpha pol \cdot A \cdot I \qquad \text{(EC 8.3)}$$

- I : Radiación solar incidente $[W \cdot m^{-2}]$
- αpol: Transmitancia del policarbonato $[.]$
- A: Área de la claraboya $[m^2]$
- $Qrad$: Calor ingresado por la claraboya $[W]$

Los resultados obtenidos son:

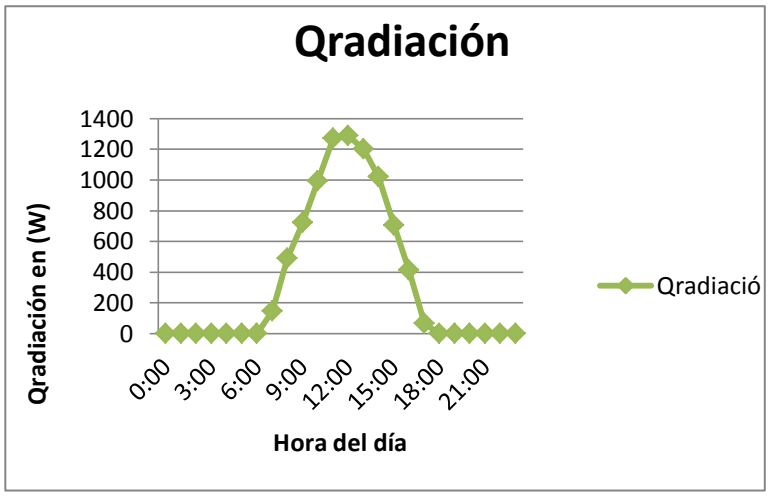

Gráfico 11. Calor de radiación a 25° inclinación

Se observa, como en el estudio lumínico, que no existe diferencia alguna en cuanto al ingreso de calor por radiación entre la claraboya simple y la doble, pues ambas presentan el mismo valor de transmitancia por estar construidas en el mismo material. Por este

motivo no se puede escoger, en este caso, cuál de las dos opciones es mejor para el diseño de una vivienda bioclimática. El ingreso total de calor en el interior de la vivienda es el resultado de calcular la integral del área que queda por debajo de la curva.

Ingreso energético diario: $\mathbf{8,31988427\ kWh/día}$

Se debe tener en cuenta que este valor no es real, puesto que representa el calor ingresado durante las horas de radiación por una claraboya si esta estuviera recibiendo radiación solar durante todo el día. Esto último es imposible, pues si estuviese orientada al Este dejaría de ingresar calor en las horas de la tarde, y viceversa. Se decide estimar pues, que el porcentaje de energía recibida, va a ser del 50%. Resulta entonces:

Ingreso real diario de una claraboya orientada al este es:

$$\mathbf{8,31988427\ kWh/día \cdot 0,5 = 4,15994214\ kWh/día}$$

Ídem para una claraboya orientada al oeste.

8.2.2. MURO INTERCAMBIADOR DE CALOR (MURO TROMBE):

El muro intercambiador de calor, consiste en una pared que separa el invernadero exterior adosado a la vivienda con un ambiente de la casa. Este muro presenta unas aperturas por donde fluye el aire del interior de la vivienda hacía el invernadero y viceversa. Las aperturas en la parte de arriba del muro es por dónde ingresa el aire caliente proveniente del invernadero hacía el ambiente, y las aperturas inferiores es por donde circula el aire frío del ambiente hacía el invernadero para ser recalentado de nuevo. Tanto unas aperturas como las otras pueden ser abiertas y cerradas cuando se desee ya que disponen de unas puertas (tapas) de madera. A continuación se adjunta un esquema para comprender mejor el comportamiento.

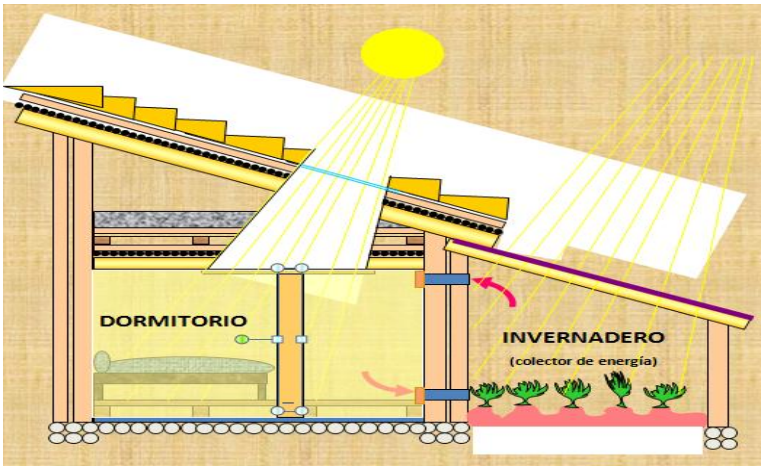

Imagen 10. Principio de funcionamiento del muro Trombe

Las siguientes consideraciones han sido tomadas:

- Se dispone de un muro con 4 aperturas que va ser tratadas como una sola apertura de área = 1,6 m²
- El techo del invernadero está construido en Agrofil de 2mm de espesor perfectamente sellado.

Se calcula el intercambio de calor según la expresión matemática para intercambio de flujo calorífico entre muros[6]:

$$Q = \Delta T^{1,5} \cdot 154 \cdot A \cdot H^{0.5} \qquad \text{(EC 8.4)}$$

- A: Área total de los orificios del muro $[m^2]$
- ΔT: Diferencia de temperaturas entre los dos ambientes $[K]$
- Q: Calor intercambiado por los locales $[W]$

[6] Cálculo realizado en anexo C

Aquí se grafican los resultados obtenidos:

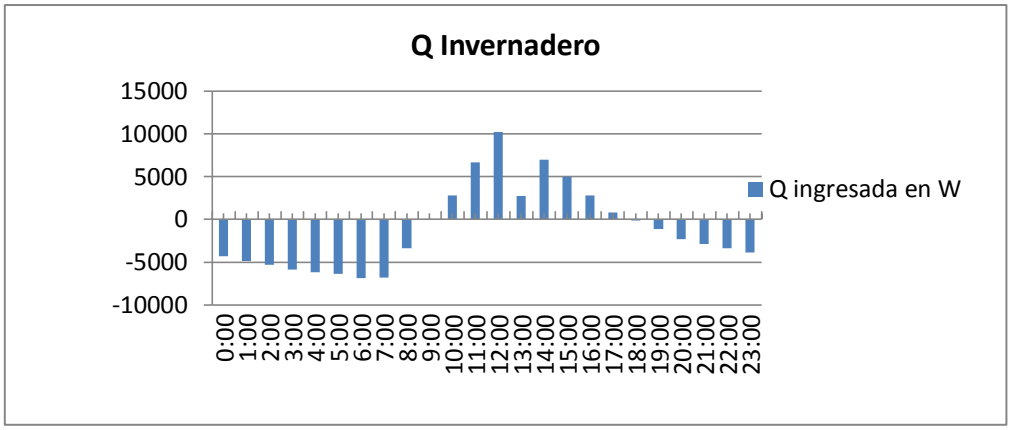

Gráfico 12. Ganancia invernadero por el muro trombe

Como se observa en los resultados graficados, el ingreso de calor al interior de la habitación se produce a partir de las 10AM (puesto que el aire del interior del invernadero demora un tiempo en calentarse) hasta las 18PM, durante esa franja de tiempo, la energía ingresada es de: $\boldsymbol{37.79 kWh \cdot día^{-1}}$

Una vez superadas las 18PM se debe proceder al cierre de las aperturas mediante las puertas, con el fin de no generar el efecto inverso y perder la energía ganada.

Se considera oportuno comentar el hecho de que a las 13 PM se ha dado una anomalía debida a que los cálculos están realizados con medidas reales, y el hecho de que uno/s de los días se haya producido un disminución en la radiación solar en dicha hora, por estar el cielo nublado, etc., se contempla después en los resultados. En condiciones normales la curva debería seguir una tendencia simétrica, factor que permitiría disponer de un valor aún más elevado de energía intercambiada.

8.3. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE LOS ELEMENTOS ESTRCUTURALES:

En esta segunda parte del estudio, se ha estudiado el comportamiento de distintas opciones para un mismo elemento estructural.

De esta forma se puede comparar el comportamiento de las distintas estructuras y decidir cual se ajusta más al objetivo perseguido. Este objetivo, no es otro que el de minimizar las pérdidas de calor al exterior.

8.3.1. ELEMENTOS:

a. Muros:

Existen muchas posibilidades en cuanto a la construcción de los muros, pero tanto las restricciones estructurales, económicas y tecnológicas, acotan estas opciones. Se ha optado por la elección, mayoritariamente, de muros cuya base sea el Adobe. Solamente en un caso se ha estudiado un muro con base de cemento (el muro de bloque hueco), puesto que son bloques de hormigón hueco y al contener aire, presentan un buen comportamiento térmico.

Se ha decidido trabajar con muros de una habitación interna hacía el exterior de la vivienda, considerando un área para el muro de 12,5 m².

- **Adobe**: el adobe se elabora a partir de barro, agua y paja. Se mezcla y se pone en un molde rectangular para darle las medidas deseadas.

  Para que estos bloques de adobe trabajen estructuralmente de una forma correcta deben cumplir la siguiente relación:

  - $\boldsymbol{H/8 = e}$

  Dónde:

  - H: Altura de la vivienda $[m]$
  - e: espesor del muro (grosor del bloque de adobe) $[m]$

- Ventajas del Adobe:

  - Bajo coste de producción (en muchos casos son los propios beneficiarios quienes lo fabrican).
  - Fácil manipulación y elaboración.

- ❖ Buen comportamiento estructural.

- Inconvenientes del Adobe:

  - ❖ Se agrieta fácilmente si su elaboración no ha sido cuidada (mala mezcla, baja calidad el barro).
  - ❖ Tiene en el agua su peor enemigo, en épocas de lluvia se deteriora sensiblemente, si es un adobe de baja calidad.
  - ❖ Requiere un mantenimiento para guardarlo de los factores atmosféricos.

A continuación se presentan las distintas opciones que se han barajado para la construcción de los muros de la vivienda.

A. Muro de Bloque Hueco:

Se trata de un muro construido por bloques de hormigón hueco, que soporta muy bien los factores atmosféricos, pues es resistente al agua, nieve, granizo, viento, etc. A continuación se calculan las pérdidas teniendo en cuenta:

λbloqueta	0,49	W/m·K
ebloqueta	0,3	m

$$q = U \cdot A \cdot (Text - Tint)$$

Siendo:

- A: Área de convección $[m^2]$
- q: Calor de convección a través del muro $[W]$
- U: coeficiente de transmisión $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

Se ha calculado el coeficiente U como:

$$Ubloqueta = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{ebloqueta}{\lambda bloqueta}}$$

Dónde:

- $hext$: Coef. de convección exterior $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
- $hint$: Coef. de convección interior $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
- $\lambda bloqueta$: Conductividad de la bloqueta $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
- $ebloqueta$: Grosor de la bloqueta $[m]$
- $Ubloqueta$: coef. de transmisión del muro $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

B. Muro de Adobe Simple:

Se ha decidido un grosor mínimo del muro de 0,5 m, pues de esta forma se asegura un buen comportamiento estructural del muro. Con este grosor y según la proporción que se debe cumplir (citada anteriormente), se puede disponer de un muro de altura = 4 metros. El muro de adobe requiere un mantenimiento pues la lluvia puede debilitarlo. Las pérdidas de calor para este muro se calculan:

λadobe	0,6	W/m·K
eadobe	0,5	m

El comportamiento se modela con las mismas expresiones, siendo el coeficiente de transmisión:

$$UadobeSimple = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{eadobe}{\lambda adobe}}$$

C. Muro doble de Adobe con cámara de aire:

Se basa en la construcción de un muro, mediante la combinación de dos muros simples de Adobe, dejando una cámara de aire entre ellos a modo de aislante. El grosor de cada muro simple es de 0.4 m con una cámara de aire, separándolos, de 0,1 m. Esta propuesta trabaja muy bien energéticamente pero presenta algunas dificultades en cuanto a la estructura, pues las juntas, en adobe doble, pueden ceder

fácilmente. Se han modelizado las pérdidas con los siguientes parámetros:

λadobe	0,6	W/m·K
eadobe	0,8	m
Raire	0,2	m²·K/W

El coeficiente U es:

$$UadobeDoble = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{eadobe}{\lambda adobe} + Raire}$$

Dónde:

- $Raire$: Resistencia térmica de la cámara de aire $[W^{-1} \cdot m^2 \cdot K]$

D. Muro Combinado (muro adobe simple+aire+Quincha):

Esta propuesta de muro, combina un muro de Adobe simple, que tiene su función en soportar estructuralmente la vivienda, una cámara de aire de 0,1 m que hace la función de aislante y un muro interno de Quincha (que no tiene que soportar la estructura sino mejorar la eficiencia energética). La Quincha está formada por un tabique de madera + un capa de paja y todo ello rebozado con arcilla. Con esta combinación se calcula el parámetro U y posteriormente las pérdidas.

λadobe	0,6	W/m·K
eadobe	0,5	m
Raire	0,2	m²·K/W
λmadera	0,13	W/m·K
emadera	0,05	m
λpaja	0,15	W/m·K
epaja	0,15	m
λarcilla	0,6	W/m·K
earcilla	0,02	m

Se obtiene U de la siguiente expresión:

$$Ucombinado = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{eadobe}{\lambda adobe} + \frac{emadera}{\lambda madera} + \frac{earcilla}{\lambda arcilla} + \frac{epaja}{\lambda paja} + Raire}$$

E. Muro Ladrillo (ladrillo exterior + aire+muro adobe simple):

Esta propuesta se enfoca al buen comportamiento de esta opción contra los factores atmosféricos, puesto que el ladrillo soporta muy bien las inclemencias. Por otro lado su comportamiento térmico es el siguiente:

λadobe	0,6	W/m·K
eadobe	0,5	m
λladrillo	0,47	W/m·K
eladrillo	0,25	m
Raire	0,2	m²·K/W

$$UadobeLadrillo = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{eladrillo}{\lambda ladrillo} + \frac{eadobe}{\lambda adobe} + Raire}$$

Considerando los cálculos realizados para cada una de las opciones anteriores, se obtienen los siguientes resultados:

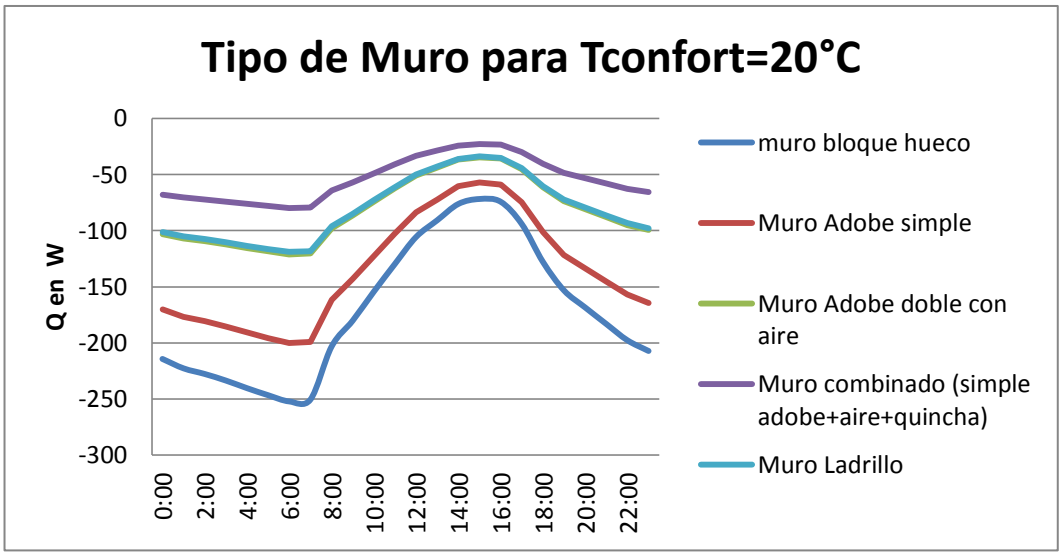

Gráfico 13. Resultado del análisis térmico para muros

Resulta interesante observar este gráfico durante las horas del día dónde no hay radiación solar. Es en estas franjas dónde las pérdidas entre las diferentes opciones si resultan muy diferentes. Se observa claramente que el muro combinado resulta la mejor opción en cuanto a la disminución de pérdidas, pues estos valores son los más óptimos. Por otro lado la segunda opción más óptima es la construcción exterior en ladrillo y revestimiento interno de adobe simple. El adobe tiene una alta absorbancia térmica y retiene el calor ingresado por la claraboya. Así pues se decide, según los resultados obtenidos, que la mejor opción es el muro de ladrillo por sus ventajas estructurales a pesar de no optimizar las pérdidas.

b. Claraboyas:

En el apartado de calcular las pérdidas de las claraboyas, se contemplan las dos opciones que se han estudiado tanto en el estudio lumínico como en las ganancias, estas son:

- Claraboya simple
- Claraboya doble con aire.

Para ambas se supone un área efectiva de 1,5 m² y las pérdidas a través de estos elementos se modelizan mediante la siguiente expresión:

$$q = U \cdot A \cdot (Text - Tint)$$

Siendo:

- A: Área de convección de la claraboya $[m^2]$
- q: Calor de convección a través de la claraboya $[W]$
- U: coeficiente de transmisión $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

Calculándose los coeficientes de transmisión, para cada una de las claraboyas, de la siguiente forma:

λ_{pol}	0,21	w/m·K
e_{pol}	0,006	m

$$Uclaraboya_simple = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{epolicarbonato}{\lambda policarbonato}}$$

$$Uclaraboya_dobl = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{epolicarbonato}{\lambda policarbonato} \cdot 2 + Raire}$$

La comparación del comportamiento de las dos opciones se observa a continuación:

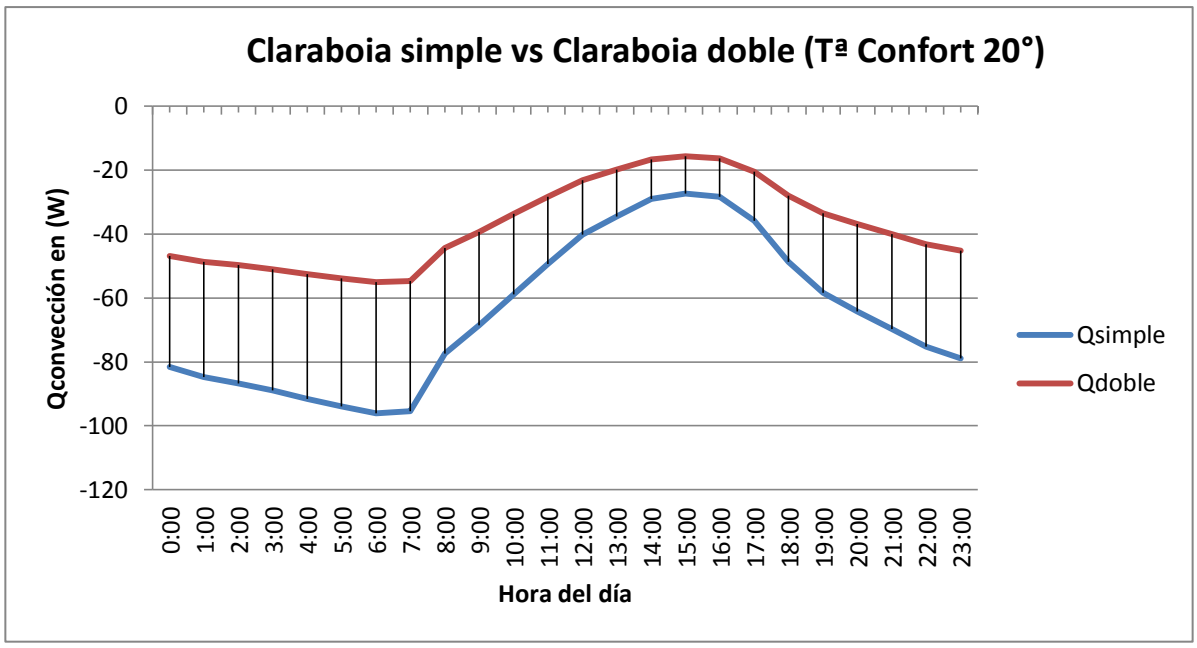

Gráfico 14. Calor de convección en los 2 modelos de claraboya

De nuevo resulta interesante observar el comportamiento térmico durante las franjas dónde no hay radiación solar. En estas, las pérdidas de la claraboya doble son significativamente menores que las de la simple. Por eso motivo, y en ocasión si, se ha decidido optar por la implementación de las claraboyas dobles.

c. Techo:

Referente al techo de la vivienda, se ha optado por estudiar una sección de 6 m². Para esta área se han propuesto 4 opciones de techo que incluyen, la cubierta y el falso techo. Se describen a continuación.

Las pérdidas se modelizan a través de la misma ecuación, anteriormente descrita:

$$q = U \cdot A \cdot (Text - Tint)$$

Siendo:

- A: Área de convección de la claraboya $[m^2]$
- q: Calor de convección a través de la claraboya $[W]$

- U: coeficiente de transmisión $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

A. Teja + falso techo de Quincha:

Consiste en una biga de madera, la cual, por la parte inferior esta rebozada en arcilla y por la posterior presenta un recubierto de paja. Entre este falso techo y las tejas existe una cámara de aire de al menos unos 0,4m que a su vez trabajara como aislante. Finalmente, el techo exterior estará elaborado en teja cerámica.

Las propiedades térmicas de este tipo de techo son:

λmadera	0,13	W/m·K
emadera	0,02	m
λpaja	0,15	W/m·K
epaja	0,06	m
Raire	0,2	m²·K/W
λadobe	0,6	W/m·K
eadobe	0,02	m
Raire	0,2	m²·K/W
eteja	0,03	m
λteja	0,47	W/m·K

Los coeficientes de transmisión resultan:

$$U_opciónA = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{eteja}{\lambda teja} + Raire} + U_quincha$$

$$U_quincha = \frac{1}{\frac{emadera}{\lambda madera} + \frac{epaja}{\lambda paja} + \frac{earcilla}{\lambda arcilla}}$$

B. Teja + falso techo de Madera:

En esta opción propuesta, el falso techo consiste en una biga de madera la cual deja una cámara de aire entre el ambiente i la teja. Se contempla esta opción puesto que presenta menos peso que la opción anterior.

Sus propiedades térmicas son:

λmadera	0,13	W/m·K
emadera	0,01	m
Raire	0,2	m²·K/W
eteja	0,03	m
λteja	0,47	W/m·K

Con estos datos se obtiene:

$$U_opciónB = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{eteja}{\lambda teja} + \frac{emadera}{\lambda madera} + Raire}$$

C. Teja + falso techo de Yeso:

Es una opción similar a la anterior, pues la única variación en este caso es que se recubre la parte inferior de la biga de madera de yeso. Se ha contemplado este caso por el hecho de que cada vez más se está extendiendo el uso del yeso por los buenos acabados visuales que proporciona a la vivienda, pero térmicamente su comportamiento no es bueno, puesto que se trata de un material con baja porosidad y por tanto no absorbe calor.

λyeso	0,81	W/m·K
eyeso	0,07	m
Raire	0,2	m²·K/W
eteja	0,03	m
λteja	0,47	W/m·K
λmadera	0,13	W/m·K
emadera	0,05	m

El comportamiento térmico del falso techo de yeso junto a un techo exterior de teja se expresa mediante el siguiente coeficiente:

$$U_opciónC = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{eteja}{\lambda teja} + \frac{emadera}{\lambda madera} + \frac{eyeso}{\lambda yeso} + Raire}$$

D. Calamina + falso techo con Paja:

Tradicional y culturalmente el techo que predomina actualmente en la autoconstrucción de viviendas en muchas de las comunidades de la sierra Andina, sigue siendo la calamina. Por eso motivo se ha decidido realizar un modelo con techo de calamina, pero combinando otros elementos con el fin de mejorar su comportamiento térmico. Se trata pues, de un falso techo de madera recubierto por paja que deja una cámara de aire antes de la calamina final.

Propiedades térmicas:

λcalamina	0,28	W/m·K
ecalamina	0,03	m
Raire	0,2	m²·K/W
λpaja	0,15	W/m·K
epaja	0,15	m
λmadera	0,13	W/m·K
emadera	0,05	m

Coeficiente U:

$$U_opciónD = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{ecalamina}{\lambda calamina} + \frac{emadera}{\lambda madera} + \frac{epaja}{\lambda paja} + Raire}$$

E. Onduline (madera+aire+paja+onduline):

El onduline es un tipo de techo prefabricado en láminas cuyas propiedades térmicas son interesantes. Además es un techo resistente pues aguanta rachas de viento de hasta 192 Km/h. Otras de sus propiedades son: Ligero (aligera la carga del techo), aislante acústico, impermeable, ecológico (fibras naturales y no contiene asbesto) y flexible. El comportamiento térmico de este techo se modela según la siguiente expresión:

h_{ext}		25	W/m²·K
h_{int}		5	W/m²·K
λonduline		0,027	W/m·K
eonduline	0,03	m	
Raire	0,2	m²·K/W	
λpaja	0,15	W/m·K	
epaja	0,15	m	
λmadera	0,13	W/m·K	
emadera	0,05	m	

Una vez estudiadas las pérdidas de las 4 opciones anteriores, se procede a analizar los resultados obtenidos.

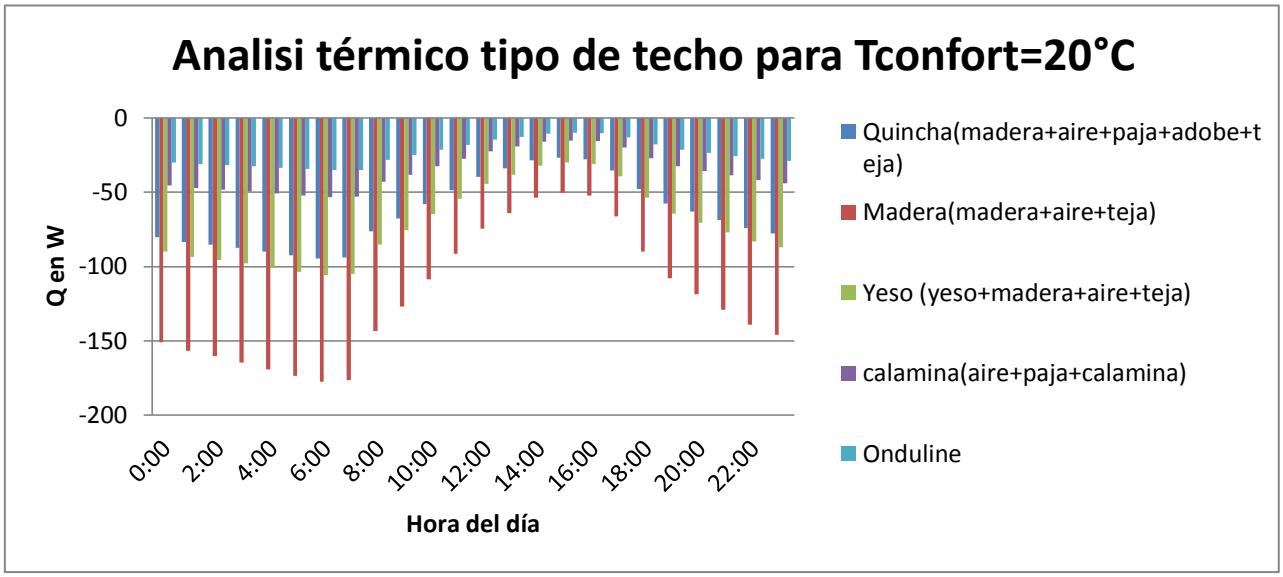

Gráfico 15. Resultado del análisis térmico para techos

Se observa que el techo de Onduline es la mejor opción para disminuir las pérdidas térmicas hacía el exterior. En las horas dónde no hay ingreso por radiación solar el comportamiento de este techo es notoriamente mejor que las demás opciones. Otro factor positivo del Onduline, ya se ha utilizado en algunas construcciones de la ciudad del Cusco con notorios resultados. Así pues se decide construir, a la vista de los resultados, el techo de Onduline con falso techo de paja.

d. Piso:

Para el cálculo de las pérdidas del piso de la vivienda se han seguido las siguientes consideraciones:

- Se han realizado mediciones de la temperatura a 2 m de profundidad.
- La variación de esta, es tan pequeña que se han supuesto temperaturas constantes para el día y para la noche.
- Se ha supuesta una superficie del piso de 6 m², con el fin de poder realizar una comparación más entendible con el techo, puesto ambos análisis presentan la misma área de estudio.

- Se ha tenido en consideración la absorbancia de los diferentes pisos propuestos en el momento de la elección.
- Se usa la siguiente expresión para calcular las pérdidas:

$$q = U \cdot A \cdot (Text - Tint)$$

Siendo:

- A: Área de convección de la claraboya $[m^2]$
- q: Calor de convección a través de la claraboya $[W]$
- U: coeficiente de transmisión $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

A. Tierra + Piedra + Cámara de Aire + Madera:

La tierra es la base dónde se va a sustentar la cimentación de la vivienda. Se ha optado por realizar también, una calzadura de piedra para asegurar la cimentación y garantizar aún más la estabilidad de la vivienda. Por la misma elevación que resulta de elaborar las anteriores capas, queda una cámara de aire debajo la porción de suelo, de esta forma se crea un aislante térmico que reduce las pérdidas térmicas del piso. Finalmente el piso interior va estar construido en madera, puesto que se considera un material asequible para los comuneros y con un buen comportamiento térmico. Las propiedades térmicas de este son:

λmadera	0,13	W/m·K
emadera	0,1	m
λtierra	2	W/m·K
etierra	2	m
Raire	0,2	m²·K/W
λpiedra	2,3	W/m·K
epiedra	0,5	m

Se modela su comportamiento térmico (pérdidas) mediante la siguiente expresión:

$$U_pisoMadera = \frac{1}{\frac{1}{hint} + \frac{etierra}{\lambda tierra} + \frac{emadera}{\lambda madera} + \frac{epiedra}{\lambda piedra} + Raire}$$

B. Tierra + Piedra + Adobe:

En este caso se trata de la misma base que en el apartado anterior, solo que esta vez se ha decidido cubrir la calzadura de piedra directamente con bloques de adobe. Esta opción es la que en la actualidad se encuentra en la mayor parte de las viviendas. Su coeficiente de transmisión es:

λadobe	0,6	W/m·K
eadobe	0,2	m
λtierra	2	W/m·K
etierra	2	m
λpiedra	2,3	W/m·K
epiedra	0,5	m

$$U_pisoAdobe = \frac{1}{\frac{1}{hint} + \frac{etierra}{\lambda tierra} + \frac{emadera}{\lambda madera} + \frac{epiedra}{\lambda piedra}}$$

C. Tierra + Piedra + Cemento:

Igual que en caso anterior, presenta la misma base para los cimientos, con el cambio que esta vez, la piedra está recubierta por una capa de cemento. Es decir, el acabado del piso es una capa de este material. En este caso se estudian las pérdidas a través de su coeficiente U:

λcemento	1,2	W/m·K
ecemento	0,1	m
λtierra	2	W/m·K
etierra	2	m
λpiedra	1,2	W/m·K
epiedra	0,5	m

$$U_pisoCemento = \frac{1}{\frac{1}{hint} + \frac{etierra}{\lambda tierra} + \frac{ecemento}{\lambda cemento} + \frac{epiedra}{\lambda piedra}}$$

D. Tierra + Piedra + Hormigón + Baldosa cerámica:

Se ha considerado interesante contemplar esta opción, pues es la tendencia que se está siguiendo en la ciudad del Cusco. La baldosa cerámica proporciona un buen acabado al suelo de la vivienda, dándole una imagen actual a esta. Se usa sobre todo en las viviendas de nueva construcción, las cuales suelen estar fabricadas con hormigón y ladrillos sustituyendo al adobe. El comportamiento térmico de la baldosa cerámica es negativo, pues es un tipo de suelo muy frió, Se calcula U para la baldosa cerámica:

λcerámica	0,7	W/m·K
ecerámica	0,02	m
λtierra	2	W/m·K
etierra	2	m
λpiedra	2,3	W/m·K
epiedra	0,5	m
λhormigón	1,23	W/m·K
ehormigón	0,1	m

$$U_pisoCerámica = \frac{1}{\frac{1}{hint} + \frac{etierra}{\lambda tierra} + \frac{ehormigón}{\lambda hormigón} + \frac{epiedra}{\lambda piedra} + \frac{ecerámica}{\lambda cerámica}}$$

E. Tierra + Piedra + Hormigón + Laminado de Madera:

Finalmente, el piso laminado es el más usado en toda la ciudad del Cusco, a pesar que como ya se ha explicado está siendo reemplazado por la baldosa cerámica. Este piso se encuentra en casi todas la viviendas de las comunidades campesinas que han emigrado a la ciudad del Cusco. Estas comunidades, han usado des de siempre la madera para sus viviendas, pues es un material que se encuentra en la naturaleza (el eucaliptus) y por tanto no supone un gasto de material para ellos.

λlaminado	0,17	W/m·K
elaminado	0,02	m
λtierra	2	W/m·K
etierra	2	m
λpiedra	2,3	W/m·K
epiedra	0,5	m
λhormigón	1,23	W/m·K
ehormigón	0,1	m

El coeficiente U se modela mediante la siguiente expresión:

$$U_pisoLaminado = \frac{1}{\frac{1}{hint} + \frac{etierra}{\lambda tierra} + \frac{ecemento}{\lambda cemento} + \frac{epiedra}{\lambda piedra} + \frac{elaminado}{\lambda laminado}}$$

Una vez estudiado el comportamiento de todas las propuestas para el suelo de la vivienda, se observan los resultados obtenidos en forma de gráfico para poder seleccionar cual de todas estas opciones es la más óptima para reducir las pérdidas térmicas de la vivienda.

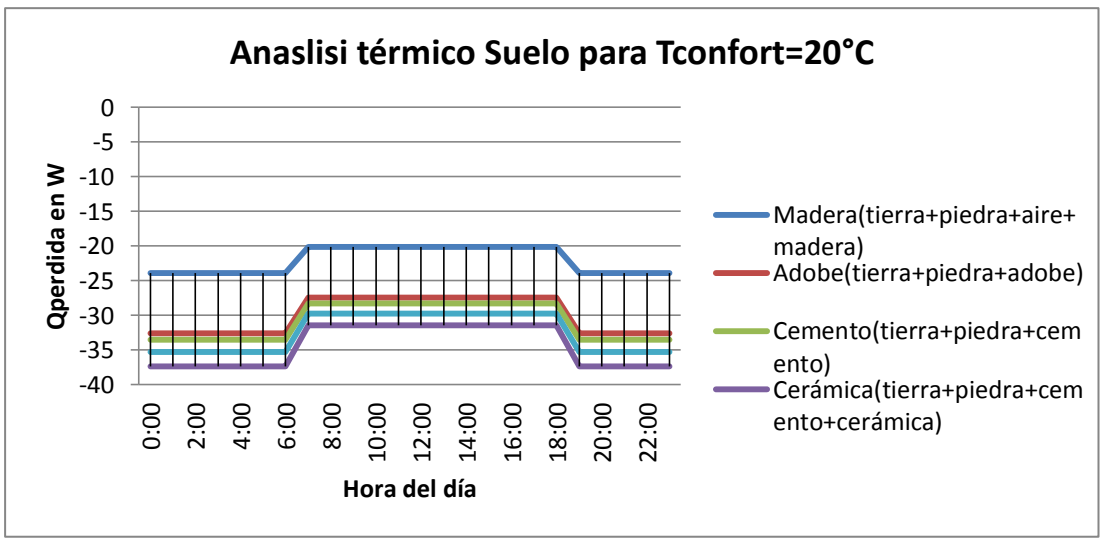

Gráfico 16. Resultado del análisis térmico para suelos

Con los resultados obtenidos, cabe resaltar, que como se había supuesto, es suelo cerámico, a pesar de dar muy buenos acabados, resulta el menos eficiente térmicamente, mientras que el suelo de madera es la mejor opción.

Esto es debido en gran parte a que se ha contemplado una cámara de aire en esta opción, y como se ha podido observar en los otros apartados da muy buenos resultados como aislante térmico.

En el caso de la elección del piso se debe tener en cuenta un factor más: la absorbancia del suelo, es decir, la capacidad que presenta este para absorber la energía que penetra a través de la claraboya.

Se han estudiado las capacidades de los materiales propuestos y se ha considerado relevante para elección final del piso.

	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	Opción E
materiales	MADERA	ADOBE	HORMIGÓN	CERÁMICA	LAMINADO
Ce (J/kg·K)	1425	890	920	800	1600
Λ (W/m·K)	0,13	0,6	1,2	0,7	0,17
espesor (m)	0,1	0,2	0,1	0,02	0,02
INERCIA TÉRMICA	6	7	3	1	2
Densidad (kg/m³)	670	1470	2280	2000	480

Tabla 4. Cálculo de la inercia térmica para los tipos de suelo

Por tanto, a pesar de que el adobe presente mejor inercia térmica, se decide seleccionar la primera opción (suelo de madera) para la construcción del suelo de la vivienda bioclimática.

e. Cerramientos:

Se han considerado como cerramientos, todos aquellos elementos que estén en contacto con el exterior de la vivienda. Es decir, las ventanas y la puerta de la vivienda al exterior. Con el fin de calcular las pérdidas de estos elementos se ha escogido un ambiente que contiene la puerta al exterior y presenta también una ventana. De esta forma se contemplan las distintas opciones para mejorar el comportamiento térmico.

A. Ventanas:

Cuando se ha realizado el estudio, se ha tenido en cuenta el precio de cotización del vidrio, el cual ha descendido notablemente, volviéndose asequible para este proyecto. Así pues, se han considerado las siguientes opciones usando el vidrio como material base.

- Vidrio Simple:

Fabricada en vidrio simple, se ha considerado un área de 1m².

λvidrio	1,13	W/m·K
evidrio	0,01	m

$$UvidrioSimple = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{evidrio}{\lambda vidrio}}$$

- Vidrio Doble con cámara de aire:

Constituida por un doble vidrio de área = 1m², con una separación entre ellos de 0,016m, espacio que contiene aire. Para este grosor de aire, se obtiene:

Raire	0,16	m²·K/W

$$UvidrioDoble = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + 2 \cdot \frac{evidrio}{\lambda vidrio} + Raire}$$

- Vidrio Triple con doble cámara de aire:

Esta ventana, presenta un triple vidrio de área = 1m², con dos cámaras de aire, cada una de ellas de grosor 0,016m.

Raire	0,16	m²·K/W

$$UvidrioTriple = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + 3 \cdot \frac{evidrio}{\lambda vidrio} + 2 \cdot Raire}$$

B. Puerta:

Se ha estudiado una puerta de área = 2m², construida en madera y con las siguientes propiedades:

λmadera	0,13	W/m·K	
emadera		0,03	m

$$Upuerta = \frac{1}{\frac{1}{hext} + \frac{1}{hint} + \frac{emadera}{\lambda madera}}$$

Con el fin de escoger el tipo de cerramientos para la vivienda, se presentan las pérdidas térmicas de cada una de las opciones:

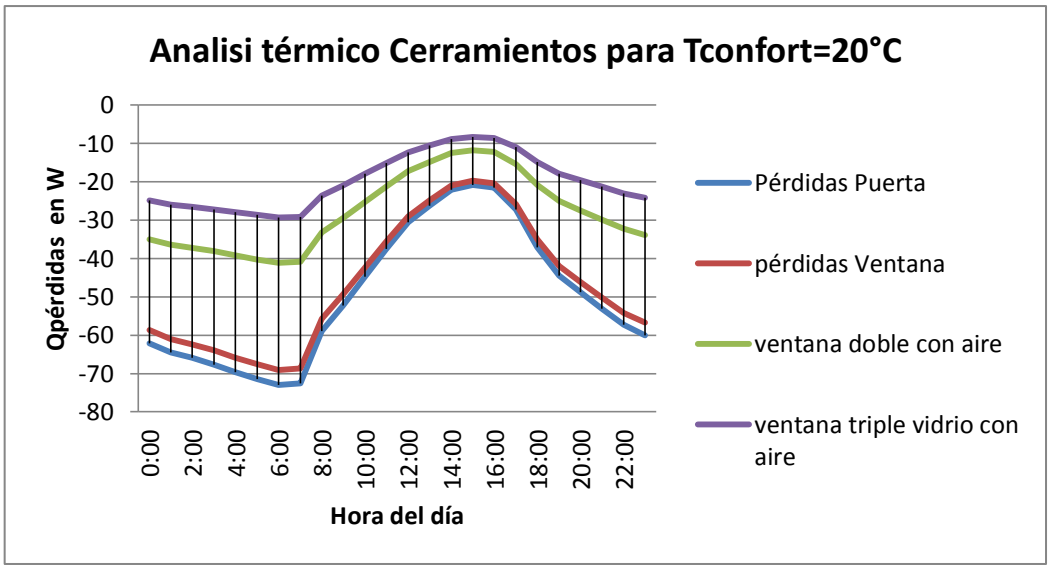

Gráfico 17. Análisis térmico para cerramientos

En el resultado gráfico, se aprecia claramente que el mejor material para la ventana, es el vidrio triple con doble cámara de aire, puesto que en las horas que no existe ingreso de calor (por no existir radiación solar), minimiza las pérdidas notablemente respeto a los demás candidatos. El vidrio simple queda totalmente descartado pues presenta prácticamente las mismas pérdidas que la puerta (teniendo esta el doble de área).

A la vista de los resultados, se decide optimizar el comportamiento de las ventanas, instalando unas tapas de madera por la parte exterior. Estas se van a cerrar durante las noches (periodo dónde se producen más pérdidas térmicas) y de esta a forma se va a conseguir una disminución de estas.

Pérdidas por infiltraciones:

Este fenómeno, es actualmente, el responsable de las bajas temperaturas en las viviendas rurales que se han visitado y estudiado con anterioridad a este proyecto. En la mayoría de las ocasiones se producen por las juntas deficitarias entre el vidrio y la estructura de madera de las ventanas, pues la autoconstrucción de estas no garantiza el buen sellado. Se ha decidido pues calcular las infiltraciones de todas las ventanas.

Se obtienen las infiltraciones mediante la siguiente expresión:

$$Infiltraciones = 0.34 \cdot N \cdot V \cdot \Delta T \qquad \text{(EC 8.5)}$$

Dónde:

- N : Tasa de renovación del aire $[.]$
- V : Volumen de aire del ambiente $[m^3]$
- ΔT: Diferencia entre las temperaturas entre el interior y el exterior $[K]$

La tasa de renovación de aire (N) se presenta tabulada según el tipo de ambiente en el que desee estudiar las infiltraciones:

Características del ambiente	**N**
0 puertas y 0 ventanas	0,5
1 puerta ext. o 1 ventana	1
1 puerta ext. o 2 ventanas	1,5
1 puerta ext. o 3 ventanas	2
Entrada a la vivienda	2

En el caso particular de este proyecto, se consideran las siguientes tasas para los ambientes disponibles:

Características del ambiente	**N**
Habitación padres	1
Habitación Hijos	1
Cocina+comedor	2
Despensa	1
Baño	1
Habitación Auxiliar	1

- Pérdidas por ventilación:

Por cuestiones de sanidad e higiene, se considera necesaria la ventilación de los ambientes con el fin de limpiarlo de posibles parásitos que pueden hacer enfermar a los habitantes de la casa. Además de evacuar los ácaros y otras partículas en suspensión que se encuentran el aire. Se debe tener en cuenta que para poder ventilar correctamente el aire se debe de crear un circuito de ventilación entre los ambientes. Por ese motivo de ha decidido ventilar simultáneamente todos los ambientes de la vivienda. Se han considerado dos ventilaciones diarias: a las 06:00 AM y a las 15:00 PM.

Cuando se realiza una ventilación se debe tener en cuenta que el aire ingresado lo hace a la temperatura exterior y por tanto el ambiente deja de estar en condiciones de confort. Por tanto se debe usar la ganancia de las claraboyas e invernadero para conseguir de nuevo la temperatura deseada.
Estas pérdidas por ventilación se calculan de la siguiente:

$$E = V \cdot Ce \cdot \rho \cdot \Delta T \qquad \text{(EC 8.6)}$$

Dónde:

- E: Energía necesaria para conseguir la Tf $[J]$
- V: Volumen del ambiente dónde se produce la ventilación $[m^3]$
- Ce: Calor específico del aire: 1227 $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
- ρ: Densidad del aire $[kg \cdot m^{-3}]$
- $\Delta T = (Tf - Ti)$ $[K]$
- Tf: Temperatura final del aire ($Tconfort = 20°C$) $[K]$
- Ti: Temperatura inicial (Text) $[K]$

De esta forma, se va a calcular:

$$E^{06:00} = V \cdot Ce \cdot \rho \cdot \Delta T$$

$$E^{15:00} = V \cdot Ce \cdot \rho \cdot \Delta T$$

Entonces, resulta:

V	ρ[7]	Ce	Ti_06:00	Ti_15:00	Tf	$E^{06:00}$	$E^{15:00}$
37,95	0,78	1227	273,25	273,625	293	199,257898	195,47452
29,75	0,78	1227	273,25	273,625	293	156,203491	153,237602
51,75	0,78	1227	273,25	273,625	293	271,715316	266,556164
31,5	0,78	1227	273,25	273,625	293	165,391931	162,251578
14	0,78	1227	273,25	273,625	293	73,507525	72,1118125
26	0,78	1227	273,25	273,625	293	136,513975	133,921938

Tabla 5. Cálculo de las pérdidas por infiltración

Se han calculado la energía necesaria (E) en kWh.

8.4. RESULTADOS OBTENIDOS:

Partiendo de los análisis individuales para cada uno de los elementos estructurales, que van a conformar la vivienda, se ha realizado una simulación para el conjunto de la vivienda con el fin de observar y validar el modelo propuesto (cumpliendo la temperatura de confort).

8.4.1. BALANCE ENERGÉTICO DIARIO: SIMULACIÓN:

Se ha decidido tener presente las siguientes condiciones:

- La altura de la vivienda se ha fijado en 2.3 m.
- Se han considerado las condiciones meteorológicas de un día tipo del mes de Julio.
- La temperatura de confort de ha fijado en 293K (20°C) para todos los ambientes.

[7] Densidad del aire a 4000 msnm = 0.65*densidad a 0 msnm = 0.65·1.2

- El muro Este recibe radiación directa durante las siguientes 4 horas: 07:00, 08:00, 09:00, 10:00 AM.
- El muro Oeste recibe radiación directa durante las siguientes 4 horas: 14:00, 15:00, 16:00, 17:00 PM.
- Los elementos estructurales elegidos resultan del estudio de las pérdidas realizado para cada uno de estos.
- Se ha considerado la Temperatura SOL-AIRE para las horas en que existe radiación directa en los muros
- Se ha considerado la Temperatura SOL-AIRE para las horas en que existe radiación directa en el techo de la construcción.

Se ha considerado oportuno presentar el análisis realizado en uno de los ambientes con el fin de facilitar la interpretación del proceso de cálculo seguido. En los demás ambientes se ha seguido el mismo proceso. Para ello se ha elegido el ambiente de los padres que cuenta tanto con pérdidas como con elementos de ganancia.

El ambiente (habitación padres) presenta las siguientes especificaciones y medidas:

- Medidas:

altura	**2,3**	**m**
ancho	**3,3**	**m**
largo	**4,6**	**m**
superficie	**15,18**	**m^2**
volumen	**34.91**	**m^3**
muro este	**11,5**	**m^2**
muro sur	**8,25**	**m^2**

- Especificaciones estructurales:
  - Muro: combinado Adobe + Ladrillo
  - Techo: Onduline + Madera + Paja
  - Piso: Tierra + Piedra + Aire + Madera
  - Cerramientos: Ventana Triple + Porticón
  - Claraboya: Policarbonato Doble + Aire
  - 2 ventilaciones por día
  - Invernadero: Sí

Con la descripción anterior se calculan las pérdidas y las ganancias del ambiente:

Muro este	**-1503,845043**
Muro Sur	**-1279,277243**
Techo	**-751,3136857**
Piso	**-1335,695341**
Ventana	**-507,644897**
Claraboya	**-896,1136837**
Ventilación	**-270,7365048**
Infiltraciones	**-3322,587447**
Ganancia invernadero	**18899,5**
Ganancia claraboya	**3203,155446**
TOTAL Pérdidas	**-9867,213844**
TOTAL Ganancias	**22102,65545**
Balance	12235,4416

Tabla 6. Resultado del balance térmico en la habitación de los padres

Se da la situación, en este caso particular, que el balance es positivo debido a la ganancia que proporciona el invernadero.

En otros ambientes, sin embargo, al no disponer de invernadero, el balance es negativo pues la ganancia de la claraboya no es suficiente como para contrarrestar las pérdidas de la estancia.

Este el caso de la cocina + comedor, dónde el balance es claramente negativo debido a su gran superficie y en consecuencia a las pérdidas que se originan.

8.4.2. RESULTADO FINAL:

A continuación se muestra una tabla resumen con las pérdidas y ganancias por ambiente así como el balance particular:

	Pérdidas	**Del total [%]**
Habitación padres	-9867,213844	17,45321755
Habitación hijos	-8640,334034	15,28310139
Habitación auxiliar	-8153,086053	14,42125273
Cocina + Comedor	-16615,258	29,38921939
Baño	-5395,851623	9,544231402
Despensa	-7863,470186	13,90897755

Tabla 7. Resumen de pérdidas energéticas por ambiente

	Ganacias	Del total [%]
Habitación padres*	22102,65545	38,7643929
Habitación hijos*	22102,65545	38,7643929
Habitación auxiliar	3203,155446	5,61780355
Cocina + Comedor	3203,155446	5,61780355
Baño	3203,155446	5,61780355
Despensa	3203,155446	5,61780355

Tabla 8. Resumen de pérdidas energéticas por ambiente

(**Son los ambientes que presentan ingreso de calor por el invernadero*.)

Con las pérdidas y las ganancias por ambiente, finalmente se obtiene el balance térmico en el interior de la vivienda.

Este balance es el que va a justificar la posibilidad de cumplir con los objetivos planteados de antemano en este estudio. Se presenta en W·h/día

	BALANCE
Habitación padres*	12235,4416
Habitación hijos*	13462,32141
Habitación auxiliar	-4949,930607
Cocina + Comedor	-13412,10255
Baño	-2192,696177
Despensa	-4660,31474
TOTAL	482,7189357

Tabla 9. Resultado del balance energético de la vivienda

Con un primer balance por ambientes, seguido por el balance total en la vivienda, se obtiene una ganancia positiva de $\mathbf{0.482}\boldsymbol{kWh/día}$, que a su vez garantiza una temperatura de confort de 20°C en toda la vivienda. Por tanto se considera que se ha cumplido el objetivo planteado, de antemano, en este estudio.

9. ESTUDIO DE AGUA CALIENTE Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS:

El tercer estudio planteado es el de gestionar el suministro de agua caliente en la vivienda durante las 24 horas del día. Para ello se ha decidido implementar, después de las experiencias observadas, un nuevo modelo de calentador de agua que combine dos tecnologías ya existentes, mejorando el rendimiento y el funcionamiento.

9.1. ANTECEDENTES:

Actualmente existe un modelo de calentador solar, que se ha instalado en varias comunidades, que consiste en la instalación de una caja acumuladora y un depósito de agua fría en el tejado de la vivienda. La construcción de esta caja calentador esta realizada con materiales de fácil obtención que sin embargo presentan un rendimiento destacable.

Se muestra una ilustración del calentador para facilitar la explicación de su funcionamiento.

Imagen 11. Modelo antiguo de calentador de agua solar

Como se puede apreciar en la imagen, el calentador solar presenta un depósito (en azul) de almacenamiento de agua proveniente de la red (o bombeada en defecto de esta) y de la caja calentadora de agua. Dentro de esta caja se encuentra el acumulador de agua caliente donde se produce el intercambio de energía y en consecuencia de obtiene agua caliente. Por último toda esta caja calentador, va recubierta por plástico AGROFIL de 2mm de espesor cuya función es la de crear el efecto invernadero en el interior.

- Ventajas:
  - Está construido con materiales reciclados.
  - Fácil construcción, en la mayoría de los casos autoconstrucción.
  - Presenta un mantenimiento muy sencillo y asequible.
  - Buen funcionamiento en las horas de fuerte radiación.

- Inconvenientes:
  - Grandes dimensiones.
  - Impacto visual agresivo.
  - Mala gestión del agua caliente en horas de radiación débil.
  - Enfriamiento rápido del agua caliente cuando no existe radiación solar. (mal aislamiento)

A la vista de los inconvenientes, se ha elaborado una propuesta que pretende ir un paso por delante no solo en el rendimiento y manejo sino también en el diseño y ergonomía de un nuevo sistema para calentar agua.

9.2. PROPUESTA DEL NUEVO CALENTADOR:

La propuesta que se ha estudiado en este apartado reside en la combinación de elementos ya existentes e incluso estudiados en apartados anteriores. De esta forma se ha optado por diseñar un calentador de agua formado por una claraboya calentador. Así se obtiene un diseño compacto que se instala en el techo de la vivienda, sin sobresalir del tejado. Este calentador está formado por distintas partes ensambladas ya que de esta forma se facilitan las futuras reparaciones (pues se realizan por bloques) y el mantenimiento. Estas son:

- Caja protectora (o carcasa protectora)
- El calentador solar
- Tapa protectora transparente (tipo claraboya)
- El reservorio (o depósito de agua de la red)
- Conexiones (tuberías)
- Los soportes de la estructura y del reservorio.

Con el fin de ilustrar la explicación del funcionamiento de este elemento, se adjunta una modelización del diseño explosionado.

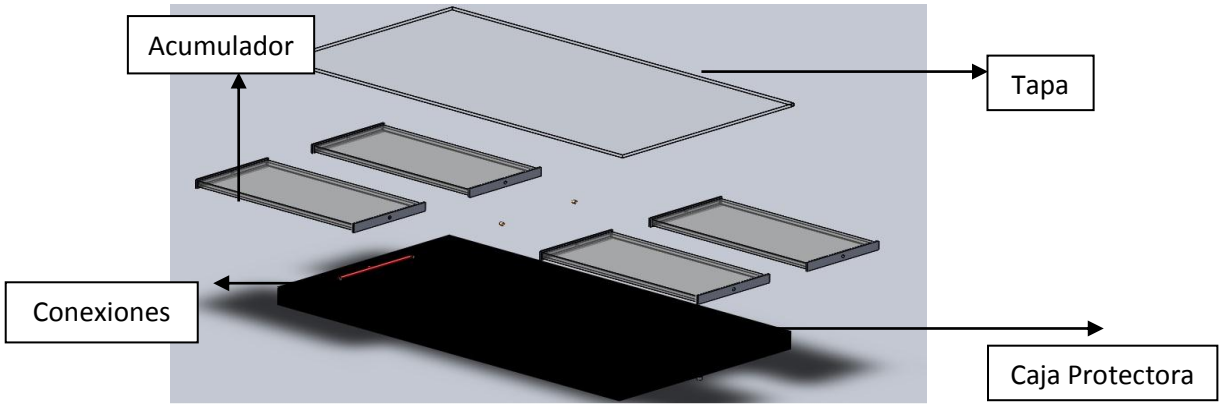

Imagen 12. Vista Explosionada del nuevo calentador

El funcionamiento de este elemento reside en el principio del efecto termosifón, según el cual el agua al calentarse sufre un desplazamiento vertical y hacia arriba basado en la disminución de su densidad con el aumento de la temperatura. Esto provoca, que el agua contenida en un depósito se encuentre estratificada, ocupando las posiciones más altas, es decir las de mayor energía térmica.

La idea fundamental consiste en tomar el agua contenida en la parte inferior del depósito (la más fría), hacerla circular a través de los colectores para elevar su temperatura y devolverla de nuevo a la parte superior del depósito (la más caliente), de esta forma vamos transformando el agua fría en caliente, que es nuestro objetivo. El mismo depósito nos sirve de acumulador para disponer de agua caliente en los períodos de baja o nula radiación.

Se ha considerado un diseño que consta de 4 calentadores de agua caliente. Con este diseño se obtienen unos 100 l de agua caliente por día, cantidad suficiente para abastecer a una familia de 6 personas (2 padres y 4 hijos).

9.3. SISTEMA DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA

Se ha dimensionado el calentador solar según la necesidad especificada para una familia modelo compuesta por 6 personas. De esta forma se considera como objetivo el conseguir 100 l de agua caliente diarios. Así pues con las siguientes consideraciones se han realizado los cálculos del dimensionamiento y forma del diseño:

- **Consideraciones Previas:**
  - Se ha trabajado con la insolación media de un día del cualquiera del mes de Julio: $\mathbf{4.85\ kWh \cdot día^{-1} \cdot m^{-2}}$
  - Se ha supuesto el calor latente del agua en: $\mathbf{4180}$
  - $\boldsymbol{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$.
  - La temperatura del agua de la red es de 12 °C.
  - Para un buen funcionamiento del efecto termosifón se ha fijado la temperatura final en 68°C.
  - Como ya se ha comentado, se quieren conseguir 100 l de agua caliente diarios.

9.3.1. NECESIDAD DIARIA:

Considerando los factores anteriores se ha estimado la necesidad energética diaria necesaria para cumplir con los requisitos deseados. Esta se obtiene de la siguiente expresión matemática:

$$Q\acute{U}til = m \cdot c \cdot \Delta T \qquad \text{(EC 9.1)}$$

Dónde:

- Q: Calor latente absorbido por el agua [J]
- m: Masa de agua a calentar $[kg]$
- c: Calor especifico del agua = 4180 $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
- ΔT: Diferencia de temperatura final e inicial del agua $[K]$

Por tanto:

$$Q = 100 \cdot 4180 \cdot (341 - 285) = 23408000\ J = \mathbf{6,50\ kWh}$$

9.3.2. ESPECIFICACIONES:

Observando las experiencias en los antecedentes, se ha rediseñado el calentador, optimizando material y mejorando la forma.

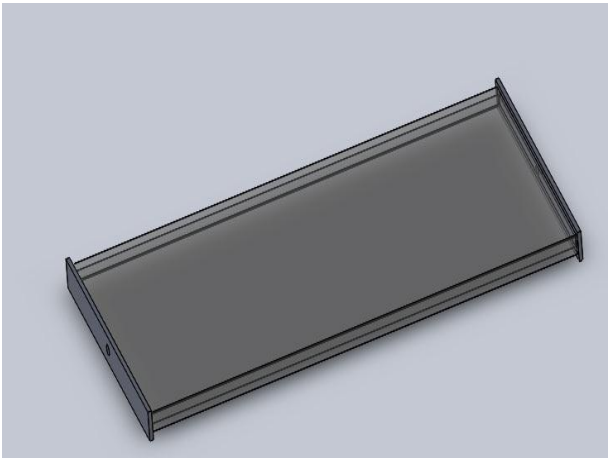

Imagen 13. Uno de los 4 acumuladores del calentador

Cada uno de los 4 acumuladores de los que se dispone, presenta las siguientes especificaciones técnicas para cumplir con los parámetros fijados, estas son:

Eficacia del calentador	
50%	
Longitud máx. calentador (limite de construcción)	
120	cm
Perímetro frontal (limite de construcción)	
120	cm
Dimensiones	
120x56x4	cm
Superficie disponible calentador	
0,672	m2
Volumen calentador	
12	l
Peso final calentador	
2	kg

Tabla 10. Especificaciones de un acumulador

9.3.3. DIMENSIONAMIENTO:

Por último, se procede al dimensionamiento del elemento en conjunto, es decir, con los 4 calentadores, las conexiones, etc. Para ello se debe calcular la superficie total necesaria para lograr la temperatura deseada según el valor de insolación solar del que dispone.

Para ello:

$$Qnecesaria = \frac{Qútil}{Eficacia} = \frac{6{,}50}{0.5} = 13\ kWh$$

$$Superficie\ necesaria = \frac{Qneceaaria}{Insolación\ disponible} = \frac{13}{4.85}$$

$$= 2.68\ m^2$$

$$Núm_calentadores = \frac{S_{necesaria}}{S_{calentador}} = \frac{2.68}{0.672}$$

$$= 3.99\ calentadores$$

De esta forma se justica la construcción de la claraboya calentador formado por 4 calentadores.

9.4. ELABORACIÓN DEL MODELO Y SUS COMPONENTES

9.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES:

a. Caja protectora (carcasa):

Finalmente las dimensiones de la caja protectora quedan sujetas a los elementos que se ensamblan en el interior, debido a este factor se ha diseñado la siguiente caja- carcasa:

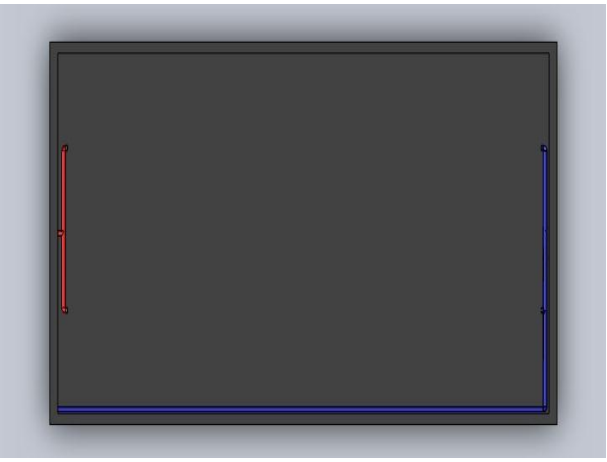

Imagen 14. Carcasa protectora (base) del calentador

)r

Sus dimensiones son: 2,580x1.390x0.12 m

Como se aprecia en la imagen, existen dos conductos diferentes. En azul se han representado los conductos que van a transportar el agua fría proveniente de la red, Por otro lado están los conductos representados en rojo, que son los encargados de mandar el agua al reservorio una vez esta ha sido calentada. También se considera oportuno resaltar el color la carcasa, puesto que el hecho de estar pintada en negro ayuda a la captación de calor y por tanto optimiza el comportamiento.

b. Calentador:

Se trata de una caja rectangular, elaborada en metal ligero y con una cubierta de vidrio transparente (pues esta todo el protegido por otra tapa superior) cuya función es propiamente la de calentar el agua.

Posee dos aperturas, una en cada extremo, por dónde ingresa el agua de la red y posteriormente, al ser calentada por donde se evacua hacía el siguiente calentador o bien al reservorio. Se ha decidió construirlo en metal ligero para facilitar el intercambio de calor (el metal es buen conductor) y para aligerar la carga del conjunto y del tejado.

Sus dimensiones son: 1.20x0.56x0.04 m
La disposición, en la que se van a colocar en el interior de la carcasa, es en forma cuadrada es decir 2 en paralelo y a su misma en paralelo con los otros dos.

c. Tapa protectora:

Se ha construido una tapa protectora en policarbonato doble con el fin de proteger los elementos internos mientras, al mismo, tiempo se evitan pérdidas energéticas. Además, el papel fundamental de esta tapa es crear el efecto invernadero en el interior, se atrapa el calor en el interior y no deja que este se pierda.

d. Reservorio:

Se trata de un depósito situado en el interior de la vivienda (para ayudar a conservar mejor la temperatura del agua) cuya función es la de recibir agua directamente de la red de subministro o en su defecto del punto agua correspondiente. Por otro lado va a acumular el agua caliente que proviene de los calentadores de tal forma que al final de un ciclo el agua del reservorio este caliente. El material de construcción es importante pues si este no fuera un aislante se perdería la energía acumulada en forma de calor. Por ese motivo se va a construir el depósito como si se tratase de un a terma eléctrica, es decir, metálico en el interior y revestido de material aislante como puede ser espuma expandida y carcasa de plástico. Se va a disponer de un volumen de 100 l para satisfacer las necesidades diarias de 6 miembros.

9.4.2. MODELO FINAL:

Una vez ensamblados los componentes anteriores, se obtiene el modelo de calentador solar propuesto.

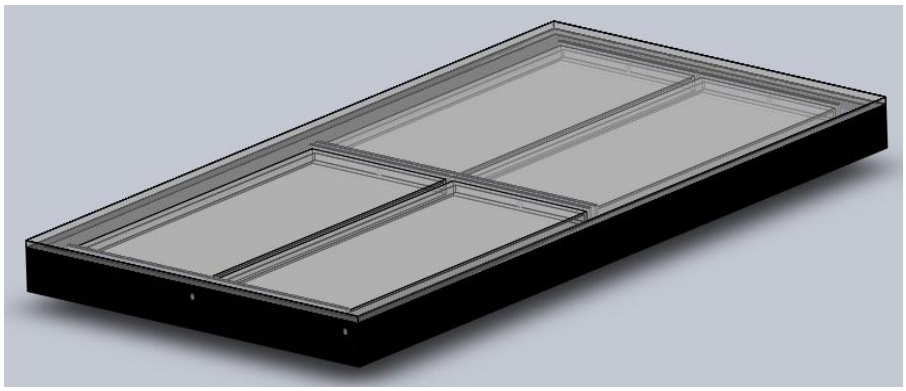

Imagen 15. Modelo final de calentador solar

Este modelo presenta variaciones respeto al utilizado actualmente, puesto que en menos volumen y tamaño caliente de forma más efectiva el agua. Además se han facilitado las posibles reparaciones y tareas de mantenimiento puesto a que se ha fabricado por bloques (huyendo del diseño de una sola pieza) que posteriormente son ensamblados. La estructura final presenta un peso de 58 Kg en vacío y de unos 102 Kg en pleno funcionamiento. La sujeción del modelo se realizara por el interior de la vivienda mediante unos perfiles angulares de acero. El acceso a la claraboya se realizará por el tejado, una vez esta haya sido vaciada y correctamente purgada para evitar desperfectos en el interior de la vivienda.

Por último se muestra una imagen de la claraboya ensamblada en el tejado, para dar una idea de las dimensiones y proporciones respecto al tejado:

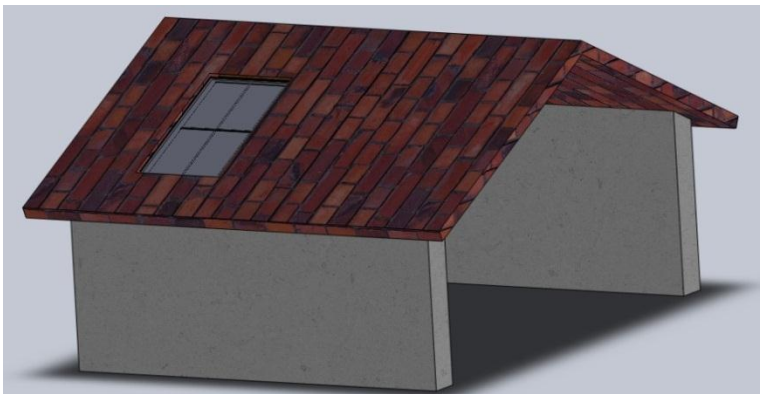

Imagen 16. Calentador solar instalado en vivienda

9.5. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS:

Cuando se instala un dispositivo como este, se debe tener en cuenta la evacuación del agua y/o las partículas sólidas que se encuentren en ella fruto del uso del agua caliente para la ducha o para lavar los platos, etc. Puesto que no se debe solucionar el problema del agua caliente generando otras problemáticas nuevas como la mala gestión de estas aguas. Es por eso que se ha considerado oportuno incluir la gestión del agua usada en este estudio y de esta forma minimizar los posibles impactos negativos que el calentador pueda crear.

Actualmente, la comunidad campesina de Punacancha dispone de una red de agua potable así como también de conexiones de desagüe de los baños y cocina. Así como al principio de este proyecto disponían de desagüe 64 de las 71 familias que habitan en esta comunidad, en la actualidad este parámetro ha alcanzado el 100% de las familias y con ello se han mejorado las condiciones higiénicas sustancialmente. Todos ellos disponen de biodigestores que filtran las partículas sólidas que se generan con las actividades cotidianas, y sus aguas residuales son enviadas a al biofiltro de la comunidad, que actualmente está funcionando a alto rendimiento, ofreciendo resultados interesantes en la depuración del agua.

9.6. MEJORAS PROPUESTAS PARA EL MODELO:

Una vez diseñado el nuevo modelo de calentador se han considerado nuevas propuestas para la gestión del agua caliente durante las 24 horas del día. Una de las propuestas que ha realizado la contraparte, ha sido la de instalar en el interior de la vivienda un depósito tipo termo, con el fin de poder traspasar el agua caliente (al final del día) y mantener el agua caliente el máximo tiempo posible. De esta forma los beneficiarios podrían hacer uso del agua en horas dónde no exista radiación solar. Se ha dejado esta propuesta en estudio puesto que se debe estudiar también des del punto de vista económico por parte de la institución (pues existe un presupuesto fijado por la cooperación para la construcción de cada una de estas viviendas).

10. DISEÑO FINAL DE LA VIVIENDA:

Se ha realizado una modelización por ordenador de la propuesta de vivienda climática que se ha estudiado en este proyecto, a continuación de muestra una imagen del exterior de la vivienda.

10.1. VISTA EXTERIOR DE LA VIVIENDA:

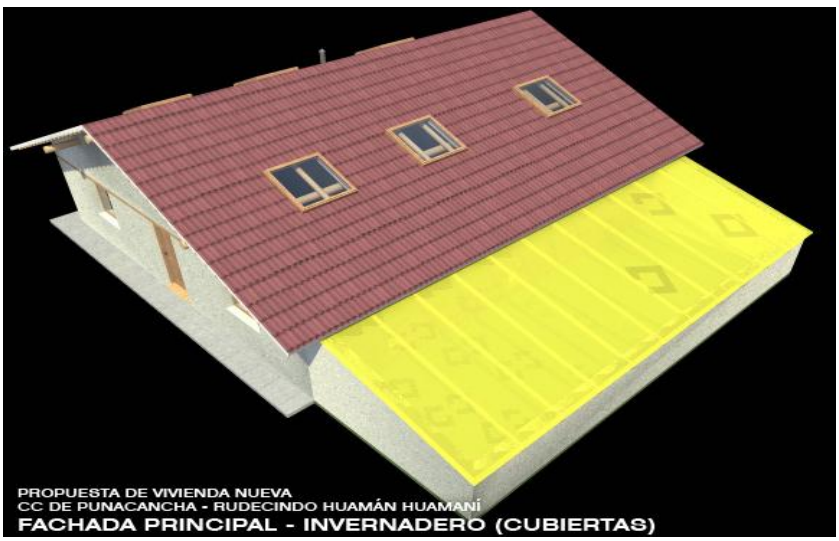

Imagen 17. Renderizado del diseño final de la vivienda

Imagen 18. Renderizado de la vivienda final en la comunidad de Punacancha

10.2. VISTA INTERIOR:

Imagen 19. Imagen del interior de la vivienda correspondiente a la cocina

Imagen 20. Imagen interior del invernadero y el muro trombe

11. IMPACTO SOCIO-CULTURAL:

Cuando se inicia un proyecto de estas características en una comunidad campesina que actualmente se encuentra relativamente aislada del núcleo político y económico de la región (el Cusco), se debe considerar el hecho de que cualquier proyecto proveniente del exterior puede causar cierto rechazo por una población que vive aún según sus normas sociales.

La comunidad campesina de Punacancha es un ejemplo de comunidad abierta al cambio, pues des de la llegada de la organización de Guamán Poma de Ayala con el primer proyecto de cooperación, la comunidad ha aceptado todos los siguientes entendiendo que estos significaban una mejoría de la calidad de vida de todos los habitantes. En una comunidad de estas características, ha resultado sencilla la capacitación de sus habitantes en el marco de las energías renovables así como también la ejecución del proyecto de vivienda digna y saludable (dentro del cual se encuentra este mismo proyecto) y cuyos resultados han causado un impacto totalmente positivo en los comuneros.

12. IMPACTO AMBIENTAL:

El impacto ambiental producido por este proyecto se mide en la cantidad de emisiones de CO2 que se generarían si se quisieran obtener los mismos resultados sin usar la energía solar. Traduciendo lo anteriormente comentado, se pretenden calcular las emisiones generadas para producir $\mathbf{82,442}\ \boldsymbol{kWh}$ (el equivalente a las pérdidas térmicas de la vivienda). En la zona de estudio se obtiene la energía principalmente con la quema de madera, pues a esa altitud existen pocos recursos de los que obtener energía (sin contemplar el uso del sol).

- Poder calorífico del Eucalipto[8]: 4564 kcal/kg
- Eficiencia de la combustión: 0.57

De esta forma, la cantidad de madera necesaria se obtiene:

[8] Dato extraído del Libro: Tecnología de la Madera.

$$Cantidad_{madera} = 82.442 \frac{kWh}{día} \cdot \frac{1\,kg}{4564kcal} \cdot \frac{860kcal}{1kWh} \cdot \frac{1}{0.57}$$
$$= 27.25\ \frac{kg\ madera}{día}$$

Una vez obtenida la necesidad diaria de madera para obtener la energía equivalente a las pérdidas, se calculan las emisiones de CO2 de la siguiente expresión:

- Contenido de carbono en madera de eucalipto[9]: 325kg/m³
- Reacción química: $\boldsymbol{C + O_2 \leftrightarrow CO_2}$
- Emisiones de CO2 para un día son:

$$325 \frac{kgC}{m^3 madera} \cdot \frac{1\,m^3}{650kg\ eucalipto} \cdot \frac{1kmolC}{12kgC} \cdot \frac{1kmol\mathrm{CO2}}{1kmolC} \cdot \frac{44kg\mathrm{CO2}}{1kmol\mathrm{CO2}}$$
$$= 1.83\ \frac{kg\mathrm{CO2}}{kgmad_euc}$$

Finalmente, se pueden determinar las emisiones de CO2 diarias:

$$27.25\ \frac{kg\ madera}{día} \cdot 1.83\ \frac{kg\mathrm{CO2}}{kgmad_euc} = 49.8675\ \frac{kg\mathrm{CO2}}{día}$$

Tal y como se planteo al principio del estudio, se ha optado por utilizar materiales para la construcción, que se encuentran en la misma zona de estudio por lo que no necesitan ser transportados ni manipulados por maquinaria. Esto produce emisiones cero en cuanto a la obtención de los materiales necesarios.

NOTA: Las emisiones de eucaliptus se podrían considerar nulas por tratarse de emisiones no forzadas.

[9] Datos Chilenos para plantaciones de Eucalipto

13. IMPACTO ECONOMICO:

En la realización de un proyecto de alto porcentaje teórico, se ha considerado oportuno realizar un presupuesto estimado, según las cotizaciones en el país de origen de la contraparte. De esta forma el presupuesto elaborado contempla el coste del trabajador, desplazamientos, alojamiento y manutención durante 6 meses,

- **Coste del trabajador:** Según cotizaciones en el país de origen, un estudiante en prácticas percibe aproximadamente unos 9 euros/h de media. Se han realizado jornadas de 8 horas diarias.

$$8\frac{h}{día} \cdot 20\frac{días}{mes} \cdot 6meses \cdot 9\frac{euros}{hora} = \mathbf{8640\ \boldsymbol{euros}}$$

- **Desplazamientos:** Se han realizado dos desplazamientos por avión cuyo coste ha sido de:
  - Barcelona**-**Lima-Cusco-Lima-Barcelona: $\mathbf{1186\ \boldsymbol{euros}}$

- **Alojamiento y manutención:** Se ha estimado en 60 soles el costo del alojamiento + manutención por día.

$$60soles \cdot \frac{1euro}{3.70soles} \cdot 30\frac{días}{mes} \cdot 6meses = \mathbf{2919\ \boldsymbol{euros}}$$

El coste total ha sido, por tanto de: $\mathbf{8640 + 1186 + 2919 = 12745\ \boldsymbol{euros}}$.
Al tratarse de un estudio teórico, el coste del trabajador no se ha contemplado, de esta forma, el coste real del proyecto ha ascendido a: $\mathbf{1186 + 2919 = 4105\ \boldsymbol{euros}}$.

14. CONCLUSIONES:

Para concluir este proyecto cabe destacar que se ha conseguido la elaboración de una vivienda piloto en la comunidad de Punacancha que puede generar replicas en las comunidades vecinas puesto que las características de la zona (comunidades vecinas) así lo permiten. Además se ha diseñado un programa que permite dimensionar y simular viviendas bioclimáticas (gestión de la luz natural, gestión del confort térmico y gestión de agua caliente) en toda la sierra Andina.

Se ha conseguido gestionar la luz natural en las horas de sol con el fin de reducir el consumo de energía eléctrica para iluminar la vivienda. De esta forma la situación económica de los habitantes ha mejorado sustancialmente, teniendo en cuenta que era uno de sus mayores gastos.

Se ha logrado el diseño de vivienda que permite una temperatura interior de confort de 20ºC obteniendo un balance energético positivo entre las pérdidas de calor generadas y la ganancia de calor. De esta forma se garantiza que la temperatura media de confort se mantenga.

Además todo este diseño se ha llevado a cabo junto a los habitantes de la comunidad con el fin de no generar un impacto socio-cultural muy grande, ni el de generar una dependencia hacía la cooperación pues los pobladores han sido capacitados para saber construir y reparar la vivienda.

Se ha realizado un nuevo diseño de calentador de agua solar que permite a las familias disponer de agua caliente en una zona muy remota. Mejorando las condiciones sanitarias e higiénicas de los habitantes.

Este PFC demuestra que es totalmente posible y viable la construcción de casas bioclimáticas que gestionen la energía solar para producir luz, calor y agua caliente de una forma limpia y sostenible. De esta forma de abre una puerta a la sostenibilidad de las construcciones con materiales locales que presentan una eficiencia energética que se debe de tener presente. Además aporta nuevos modelos energéticos para el futuro de las energías renovables en la región del Cusco.

Por último cabe resaltar las actividades que se han realizado de forma paralela a este proyecto como han sido:

- Capacitación de la población en el marco de las energías renovables, de esta forma se consigue la aceptación del proyecto y el mantenimiento de este.
- Construcción de una vivienda bioclimática sostenible en la comunidad, así como mejoras en distintas viviendas ya existentes.
- Replicas por parte de comunidades vecinas en cuanto a la construcción de partes de la vivienda modelo (invernaderos, claraboyas, calentadores solares, etc.)

La situación actual del proyecto, con la vivienda totalmente finalizada, es la de monitorear el comportamiento de esta para poder observar el correcto funcionamiento y poder mejorar el diseño de lo que se crea conveniente. Tanto la contraparte como la ONG Guamán Poma de Ayala se encargan de estas labores.

15. VALORACIÓN PERSONAL:

La experiencia que supone realizar un proyecto de estas características en la región del Cusco, es muy gratificante. No solo en lo personal, pues la interacción con los comuneros es un aprendizaje constante de factores que hasta ahora resultaba impensable. También ha sido muy positivo en cuanto a lo académico pues el hecho de calcular todos los factores de la vivienda ha resultado en algún caso más que laborioso.

16. AGRADECIMIENTOS:

A toda mi familia por haberme apoyado tanto des de la distancia.
A Sara por haber querido vivir este proyecto conmigo
A Lluís Batet por ser mi tutor en este proyecto y haberme permitido vivir esta experiencia tan bonita e interesante
Al CCD por el apoyo económico prestado y todas las facilidades que me ha dado
Al centro Guamán Poma de Ayala por su formación, tiempo de dedicación y su confianza en mi.

17. BIBLIOGRAFIA:

[1] Lluís Albert Bonals, *Transferència de calor*, CPDA-ETSIB (2007)

[2] Guamán Poma de Ayala, *Energías Renovables en el Valle Sur* (2008)

[3] Santiago Vignote, *Tecnología de la madera*

[4] Cabeza Laínez, José María, *Fundamentos de transferencia radiante luminosa, o la verdadera naturaleza del factor de forma y sus modelos de cálculo*, Sevilla, Netbiblo S.L. , 2009.

[5] Yañez Parareda, Guillermo, *Energía solar, edificación y clima, elementos para una arquitectura solar (tomo 1),* Madrid, Ministerio de obras públicas y urbanismo, 2002.

[6] Olgyay, Victor, *Arquitectura y clima, Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas,* Barcelona, Gustavo Gili, 2008, (versión castellana de Josefina Fruntado y Luis Clavet).

[7] Guaman Poma, *Guía técnica de iluminación eficiente, 2008*

[8] *www.**censolar**.es* *(15/09/2011)*

[9] *www.**pvsyst**.com/* *(10/10/2011)*

FE DE ERRATAS

- Pág.30:
  - En la ecuación 7.1 (E.C 7.1):
    - En vez de [lux] en el SI es [lx] (cambiado en los demás casos)
    - En vez de [$lúmen$] en el SI es [lm] (cambiado en los demás casos)
  - En la ecuación 7.2 (E.C 7.2):
    - En vez de [$candela$] en el SI es [cd] (cambiado en los demás casos)

- Pág.65:
  - Tabla 4:
    - Las unidades de las magnitudes de la tabla son:

      Ce: $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

      λ: $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

      ρ: $[kg \cdot m^{-3}]$

- Pág.69:
  - En la ecuación 8.6 (E.C 8.6):
    - Las unidades de las magnitudes usadas son:

      Ce: $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

      ρ_{aire}: $[kg \cdot m^{-3}]$

- Pág. 77:
  - En “consideraciones previas”:
    - En vez de $[J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ para el calor latente del agua, debería ser: $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$.
  - En la ecuación 9.1 (E.C 9.1):
    - En vez de $[Kg]$ para la masa, debería ser: $[kg]$
    - En vez de $[J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ para el calor latente del agua, debería ser: $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$.

- Pág.86:
  - En “IMPACTO AMBIENTAL”:
    - En vez de $[Kcal/Kg]$ para el poder calorífico del Eucaliptus, debería ser: $[kcal \cdot kg^{-1}]$

- Pág.87:
  - En “IMPACTO AMBIENTAL”:
    - En cantidad de madera, en vez de:

$$Cantidad_{madera} = 82.442 \frac{kWh}{día} \cdot \frac{1\ Kg}{4564Kcal} \cdot \frac{860Kcal}{1kWh} \cdot \frac{1}{0.57} = 27.25\ \frac{Kg\ madera}{día}$$

Debería ser:

$$Cantidad_{madera} = 82.442 \frac{kWh}{día} \cdot \frac{1\ kg}{4564kcal} \cdot \frac{860kcal}{1kWh} \cdot \frac{1}{0.57} = 27.25\ \frac{kg\ madera}{día}$$

- En :

$$325 \frac{KgC}{m^3 madera} \cdot \frac{1\ m^3}{650Kg\ eucalipto} \cdot \frac{1KmolC}{12KgC} \cdot \frac{1Kmol\mathrm{CO2}}{1KmolC} \cdot \frac{44Kg\mathrm{CO2}}{1Kmol\mathrm{CO2}}$$
$$= 1.83\ \frac{Kg\mathrm{CO2}}{Kgmad_euc}$$

Debería ser:

$$325 \frac{kgC}{m^3 madera} \cdot \frac{1\ m^3}{650kg\ eucalipto} \cdot \frac{1kmolC}{12kgC} \cdot \frac{1kmol\mathrm{CO2}}{1kmolC} \cdot \frac{44kg\mathrm{CO2}}{1kmol\mathrm{CO2}} = 1.83\ \frac{kg\mathrm{CO2}}{kgmad_euc}$$

-