



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

ESTUDIO Y PROPUESTA DE CONVERSIÓN DEL MODELO DE ACONDICIONAMIENTO DE UNA VIVIENDA

Autor: Bruno Rodríguez Esteban
Director: Dr. Luís Manuel Mochon Castro

Madrid
Agosto de 2018

*A mis padres Perla y Fernando,
por su inestimable amor y apoyo.*

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estudio y propuesta de conversión del modelo de acondicionamiento....
de una vivienda

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas
en el curso académico 2017/2018 es de mi autoría, original e
inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información
que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Bruno Rodríguez Esteban Fecha: 30/08/2018



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Luis Mochón Castro

Fecha: 31/ 08/2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Bruno Rodríguez Esteban _____
DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: _____
Estudio y propuesta de conversión del modelo de acondicionamiento de una vivienda _____,
que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- Burgos, a 30 de Agosto de 2018

Brunel

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

[illegible]

Estudio y propuesta de conversión del modelo de acondicionamiento de una vivienda

Autor: Bruno Rodríguez Esteban

Director: Dr. Luís Manuel Mochón Castro

Abstracto— En un contexto generalizado de concienciación hacia la sostenibilidad, el gran reto de hoy en el acondicionamiento de viviendas es conseguir que los sistemas de confort sean eficientes, sostenibles y asequibles.

Este estudio hace una propuesta de conversión del modelo de acondicionamiento de una vivienda estándar bajo un clima propio Europeo, el de Países Bajos. Para ello se lleva a cabo, con el Software Matlab, una simulación de la vivienda. Se persigue identificar las carencias de la vivienda con respecto al aislamiento y al sistema de acondicionamiento. Seguidamente se estudian las diferentes alternativas que existen a las tecnologías más extendidas hoy en día. Finalmente se hace un pequeño estudio económico para estimar la amortización de los nuevos sistemas propuestos.

Las viviendas pueden disminuir su demanda energética en un 22% con sencillas reformas que no alteran la vida de los que ahí viven. También se puede eliminar la dependencia de combustibles fósiles empleando tecnologías como las bombas de calor o suelos radiantes y hábitos responsables. Además, se puede eliminar definitivamente la huella de carbono si se dispone de la posibilidad de instalar generación renovable. La inversión total para la conversión de una casa pequeña de 2 personas es menor que 15.000 €, y los periodos de amortización varían de una opción a otra.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía destinada a acondicionar viviendas supone un 17% de la demanda total. Por ello, se dedican grandes esfuerzos para disminuir dicha demanda y sustituir las fuentes primarias de energía, generalmente de origen fósil, por fuentes renovables. Un estudio detallado de las necesidades térmicas de una vivienda junto con la utilización inteligente de las diversas tecnologías existentes ayudaría a reducir drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles, mayormente responsables de la contaminación y efectos sobre el clima.

II. OBJETIVOS

Los objetivos de este estudio están enfocados hacia la conversión del modelo de acondicionamiento de una vivienda:

- Identificar las carencias de los sistemas de acondicionamiento actuales en viviendas. Se llevará a cabo mediante las simulaciones.
- Estudiar las alternativas sostenibles que existen.
- Conocer las distintas soluciones en función del tipo de vivienda y de clima
- Disponer de una lista de recomendaciones para el ahorro energético y la promoción de las energías limpias

III. ESTADO DEL ARTE

A. Tecnologías

Ya se han hecho grandes esfuerzos para aumentar la eficiencia térmica de las viviendas y edificios. Existen diversas tecnologías, estrategias y técnicas para ello, como:

- Aislantes.
- Arquitectura orientada a la eficiencia energética.
- Sistemas de calefacción, ventilación y refrigeración.
- Otros sistemas de generación y aprovechamiento de la energía, como: bombas de calor, suelo radiante, placas solares y aerogeneradores, motores de cogeneración, buffers de calor, colectores solares, energía geotérmica, intercambiadores de calor con el subsuelo, almacenamiento de calor en acuíferos y biomasa.
- Modelos matemáticos.

B. Variables de control

En segundo lugar, existen distintas variables que definen el confort. El cuerpo no siente la temperatura en sí, si no el ritmo de la pérdida de calor. Las variables que definen dicha pérdida son:

- Temperatura del aire.
- Humedad relativa.
- Velocidad del aire.
- Temperatura media radiante.
- Ropa.
- Metabolismo.

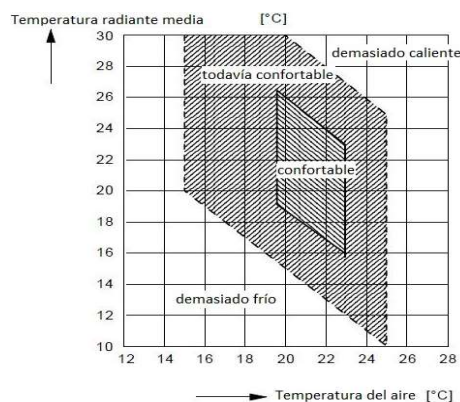


Figura 1: Área de confort de la temperatura del aire con respecto a la temperatura radiante media

Las dos variables que se emplean para medir el confort de una estancia son la temperatura media radiante y la temperatura del aire. Éstas son las variables que se pueden controlar de una forma más sencilla y menos costosa.

IV. MODELADO DE LA VIVIENDA

La simulación se hará linealizando las expresiones de transmisión de calor de la vivienda y construyendo un sistema de matrices, por el que se obtendrá para cada hora del año, a partir de las condiciones ambientales, las temperaturas resultantes de la vivienda y la demanda térmica.

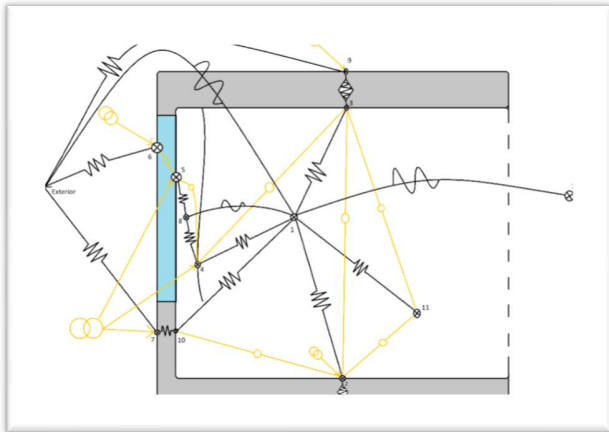


Figura 2: transmisión de calor entre parets de una estancia

La vivienda que se simula es la que se puede apreciar en la Figura 3: Vivienda, con cocina, salón y corredor orientados hacia el sur.



Figura 3: Vivienda

V. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La demanda térmica de una vivienda tipo con valores propios de una construcción de los años 70 es de unos 4,37MWh.

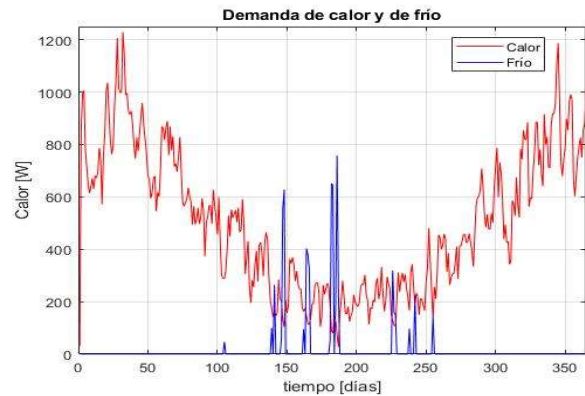


Figura 4: Demanda energética

La mayor pérdida de energía, de mayor a menor, se produce a través de los acristalamientos, la fachada y el techo. Mediante reformas sencillas poco invasivas, como la instalación de paneles aislantes exteriores o la inyección de poliuretano en las cámaras de aire de las fachadas para romper el puente térmico, se puede reducir el consumo de calefacción en un 22%. Véase la bajada de demanda (línea de puntos antes de las reformas y continua después) en la Figura 5.

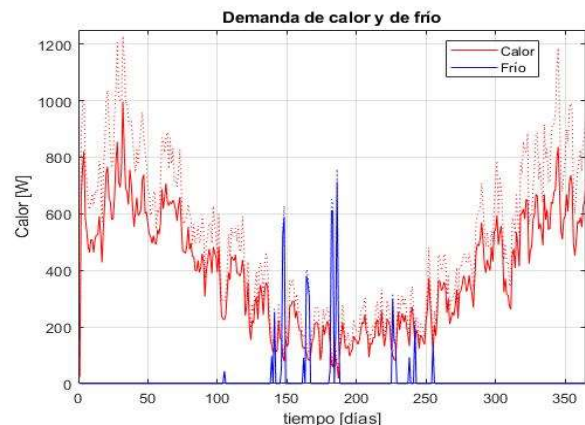


Figura 5: Demanda térmica con reformas

En cuanto a los acristalamientos, se puede reducir el consumo instalando persianas, que funcionarán como paneles aislantes durante las horas en las que no haya luz, al igual que de bloqueadores en situaciones donde hay una alta radiación solar.

VI. ALTERNATIVAS SOSTENIBLES DE ACONDICIONAMIENTO

Existen dos alternativas para eliminar la dependencia de los combustibles fósiles: transformar la vivienda en térmicamente pasiva o disminuir la demanda energética al máximo y emplear sistemas de acondicionamiento sostenibles. La primera opción no es posible en este caso, ya que se deben hacer reformas demasiado profundas en la vivienda. Por ello, se trata de buscar alternativas de acondicionamiento a las actuales calderas de combustibles fósiles. Las alternativas

estudiadas se resumen en la siguiente tabla, la cual indica su conveniencia o no en este caso.

Tabla 1: Tecnologías existentes

Tecnología	¿Adecuada para este caso?
Paneles exteriores aislantes	✓
Inyección de aislante en pared	✓
Cortinas	✓
Persianas	✓
Bombas de calor	✓
Suelo radiante	✓
Micro generación renovable	✓
Motor de cogeneración	✗
Acumuladores de calor	✓
Colectores solares	En localizaciones del sur ✓
Energía geotérmica	✗
Intercambiador de calor con el suelo	✗
Almacenamiento de energía en Acuíferos	✗
Biomasa	✓

Finalmente, teniendo en cuenta el coste de las inversiones y los periodos de amortización, se proponen varias alternativas en las que se hacen ciertas reformas y se adoptan algunas tecnologías para cambiar no solo el modelo de acondicionamiento, si no también aportar un sistema de generación eléctrica que elimine la dependencia del suministro energético actual, el cual tiene un mix energético basado en aproximadamente un 50% energías contaminantes. En la siguiente tabla se muestra propuesta seleccionada:

Tabla 2: Propuesta de conversión

Tecnología	Coste unitario	3.
Paneles exteriores aislantes	56€/m2	✓
Inyección de aislante en pared	600€/vivienda	✓
Bombas de calor	2.969,99€	✓
Suelo radiante	50€/m2	✗
Micro generación renovable	2.985€	✓
Acumuladores de calor	155€	✓
Biomasa	2.599€	✗
Coste total para la vivienda	7.969,99€	
Amortización (aproximada)	11,5 años	

VII. CONCLUSIÓN

En este trabajo se han identificado las carencias del acondicionamiento de una vivienda estándar, se han sugerido reformas y mejoras, estudiado las alternativas que existen a los actuales sistemas de acondicionamiento y propuesto una serie de reformas para una vivienda en concreto.

El principal motivo de la pérdida de calor en las viviendas es la capacidad aislante de sus materiales. Con reformas no muy invasivas ni costosas se puede incrementar la eficiencia del sistema. Existen varias tecnologías que combinadas pueden sustituir no solo al sistema de calefacción y agua caliente, sino también aportar refrigeración y sustituir en gran medida al sistema de suministro eléctrico. Por último, para un piso con posibilidad de instalar un sistema de energía renovable, se puede lograr el objetivo de transformarla en una vivienda con cero emisiones con una inversión que ronda los 12.000€.

Como conclusión, se puede afirmar que la transformación del modelo de acondicionamiento de una vivienda estándar es relativamente asequible económicamente. Es una inversión recuperable y que beneficia a todos. Sin embargo, no se puede decir que se pueda llevar a cabo una transformación hasta un modelo de cero emisiones en todas las viviendas. Para lograr una transformación así, es necesario bien disponer de un sistema de generación de energía renovable o que el mix energético cambie radicalmente.

Study and proposal of conversion of a house conditioning system

Author: Bruno Rodríguez Esteban

Director: Dr. Luís Manuel Mochón Castro

Abstract— In a generalized context of awareness of sustainability, the current challenge in housing conditioning is to make comfort systems efficient, sustainable and affordable.

This study makes a proposal of conversion of a standard house conditioning system under a European climate. For this, it is carried out a simulation of the house with Matlab. The aim is to identify the lack of efficiency of the insulation and conditioning system. Then the different alternatives are assessed. Finally, a small economic study is made to estimate the amortization of the proposed systems.

A standard house can reduce its energy demand by 22% with simple reforms that do not alter the lives of those who live there. Fossil fuel dependence can also be eliminated by using technologies such as heat pumps or radiant floors and responsible habits. In addition, the carbon footprint can be definitively erased if the possibility of installing renewable generation is available. The total investment for the conversion of a small 2 people house is less than €15,000, and amortization periods vary from one option to another.

I. INTRODUCTION

The energy demand for housing conditioning accounts for 17% of the total demand. Therefore, great efforts are being made to reduce it and replace the primary sources of energy, usually fossil fuels, by renewable sources. A detailed study of a home thermal needs coupled with the intelligent use of the various existing technologies would help to drastically reduce the dependence on fossil fuels, mostly responsible for pollution and effects on the weather.

II. OBJECTIVES

The objectives of this study are focused on the conversion of the housing conditioning model:

- Identify the deficiencies of existing housing conditioning systems. It will be done through simulations.
- Study the sustainable alternatives that exist.
- Assess the different solutions depending on the type of housing and climate.
- Make a list of recommendations to reduce energy consumption and foster clean energies.

III. STATE OF THE ART

A. Technologies

Great efforts have already been made to increase the thermal efficiency of homes and buildings. There are several technologies, strategies and techniques for this, such as:

- Insulation.
- Energy-efficient architecture.
- Heating, ventilation and refrigeration systems.
- Other systems of generation and use of energy, such as: heat pumps, radiant floor, solar generation and wind turbines, co-generation motors, heat buffers, solar collectors, geothermal energy, subsoil heat exchangers, storage of heat in aquifers and biomass.
- Mathematical models.

B. Control Variables

Secondly, there are different variables that define comfort. The body does not feel the temperature itself, but the rate of heat loss. The variables that define the loss are:

- Air temperature.
- Relative humidity.
- Air velocity.
- Radiant medium temperature.
- Clothing.
- Metabolism.

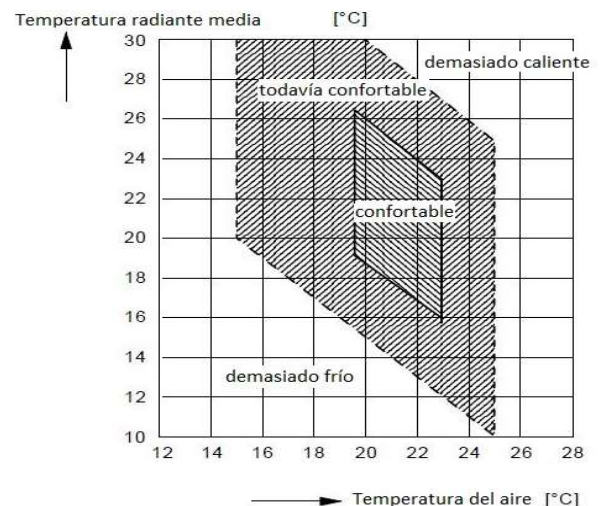


Figure 1: Comfort area of air temperature with respect to medium radiant temperature

The two variables that are used to measure the room comfort are the average radiant temperature and the temperature of the air. These are the variables that can be controlled in a simpler and less expensive way.

IV. HOUSING MODELING

The simulation will be made linearizing the heat transmission equations of the house and building a system of matrices, by which, for every hour of the year and from the environmental conditions, the temperatures resulting from the housing and the thermal demand will be obtained.

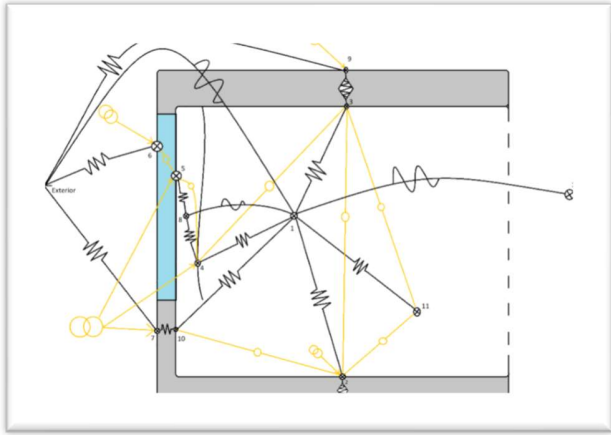


Figure 2: Heat transmission between Walls of a stay

The housing that is simulated is the one that can be seen in the Figure 3, with kitchen, lounge and corridor facing south.



Figure 3: Dwelling

V. SIMULATIONS AND RESULTS ANALYSIS

The thermal demand of a standard dwelling with typical values of a 70's construction is about 4, 37MWh.

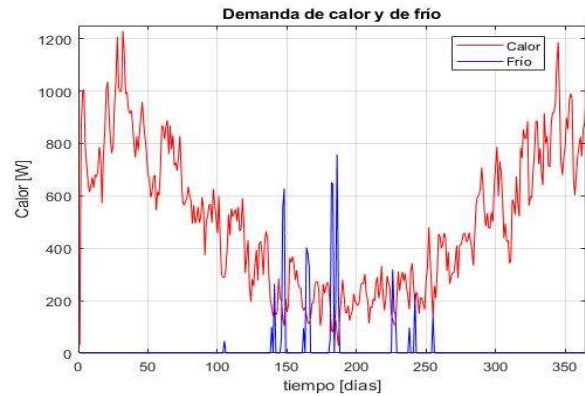


Figure 4: Energy demand

The greatest loss of energy, with decreasing order, takes place through the glazing, the facade and the ceiling. Through simple, non-intrusive reforms such as the installation of external insulating panels or the injection of polyurethane into the air chambers of the facades to break the thermal bridge, heating consumption can be reduced by 22%. See the drop of demand (points line before the reforms and solid line after) in The Figure 5.

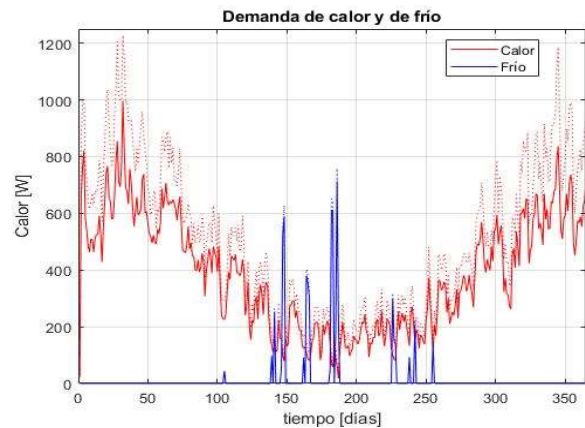


Figure 5: Thermal demand with renovations

As to the glazing, the consumption could be reduced by installing outer blinds, which will function as insulating panels during the hours when there is no light, as well as of sun blockers in situations where there is a high radiation.

VI. SUSTAINABLE CONDITIONING ALTERNATIVES

There are two alternatives to eliminate the dependence on fossil fuels: transform it into a passive house or decrease the energy demand to the minimum and use sustainable conditioning systems. The first option is not possible in this case, because costly improvements should be done in the house. Therefore, alternatives to current conditioning systems must be found. The alternatives studied are summarized in the following table, which indicates its suitability in this case.

Table 1: Existing Technologies

Technology	Appropriate for this case?
Insulating exterior panels	✓
Wall insulation Injection	✓
Curtains	✓
Blinds	✓
Heat Pumps	✓
Radiant Floor	✓
Renewable Micro-generation	✓
Co-generation engine	✗
Heat accumulators	✓
Solar Collectors	In South locations ✓
Geothermal energy	✗
HEAT exchanger with floor	✗
Energy storage in aquifers	✗
Biomass	✓

Finally, considering the cost of investments and amortization periods, several alternatives are put forward in which certain improvements are made and some technologies are adopted to change not only the conditioning system, but also to provide a system of electrical generation that eliminates the current energy supply dependence, which has a mix based on approximately 50% polluting energies. The following table shows selected proposal:

Table 2: Conversion proposal

Technology	Unit Ribs	3.
Insulating exterior Panels	56€/m2	✓
Wall insulation Injection	600 €/pax	✓
Heat Pumps	2.969,99€	✓
Radiant Floor	50€/m2	✗
Renewable Micro-generation	2.985€	✓
Heat accumulators	155€	✓
Biomass	2.599€	✗
Total cost	7.969,99€	
Amortization (approximate)	11.5 years	

VII. CONCLUSION

In this study we have identified the deficiencies of the house conditioning system, improvements have been put forward and, the alternatives that exist to the current conditioning systems have been assessed. Furthermore, a series of improvements for a dwelling have been suggested.

The main reason for the loss of heat in the houses is the

insulating capacity of their materials. With non-invasive and relatively cheap reforms, the efficiency of the system can be increased. There are several technologies that combined can replace not only the heating system and hot tap water, but also provide refrigeration and largely replace the power system. Finally, for a house with the possibility of installing a renewable energy system, it is possible to achieve the goal of transforming it into a zero-emission house with an investment that is around €12,000.

In conclusion, it can be said that the transformation of the of the house conditioning system is relatively affordable. It's a recoverable investment that benefits everyone. However, it cannot be said that a transformation can be carried out to a zero-emission model in all cases. To achieve such a goal, it is necessary to have a system of renewable energy generation or a radical change of the energy mix.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

ESTUDIO Y PROPUESTA DE CONVERSIÓN DEL MODELO DE ACONDICIONAMIENTO DE UNA VIVIENDA

Autor: Bruno Rodríguez Esteban
Director: Dr. Luís Manuel Mochon Castro

Madrid
Agosto de 2018

ÍNDICE

Capítulo I – Introducción.....	1
Motivación del proyecto.....	1
Objetivos	2
Metodología / Solución desarrollada.....	2
Recursos y herramientas empleadas	3
Estudio de los trabajos y tecnologías existentes	3
Aislantes.....	3
Arquitectura orientada a la eficiencia energética.....	4
Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC).....	4
Otros sistemas de generación y aprovechamiento de energía	5
Modelos matemáticos	6
Base teórica.....	6
Teoría de Confort	6
Modelado de una vivienda	9
Capítulo II – Modelado del sistema	13
Vivienda	13
Propósito.....	14
Límites del sistema y Conceptos del modelo.....	14
Suposiciones.....	15
Subdivisión el sistema.....	16
Ecuaciones	18
Simulación.....	22
Capítulo III –Simulaciones y Análisis de Resultados.....	25
Caso base: Vivienda tipo	25
Vivienda con mayor resistencia en las paredes y mayor aislamiento en techo	28
Vivienda con uso de cortina para aislar	30
IV – Alternativas sostenibles de acondicionamiento	33
Bombas de calor.....	33
Suelo radiante.....	35
Placas solares y aerogeneradores.....	37
Motores de cogeneración.....	39
Buffers de calor:.....	40
Colectores solares	41
Energía geotérmica	42

Intercambiador de calor con el subsuelo + bomba de calor:	42
Almacenamiento de energía en acuíferos:	43
Biomasa:.....	44
Biodigestores	45
Capítulo V – Propuesta de conversión	47
Capítulo VI – Recomendaciones y Conclusión	51
Bibliografía	53
Anexo	55
Código	55
Equipos propuestos	75
Especificaciones de cálculos:	77
Matrices	79

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El hombre siempre ha buscado protegerse de las condiciones climáticas adversas. Esta protección ha sido crucial para la supervivencia del ser humano. Desde un fuego en el suelo de una cueva hasta los sistemas inteligentes de hoy en día, los sistemas de calefacción y confort se han ido transformando y mejorando para cubrir las varias necesidades existentes.

De dos generaciones a esta parte, la habitabilidad y el confort de viviendas y edificios ha sufrido enormes transformaciones para cubrir los más altos niveles de exigencia. Dichos cambios han sido posibles gracias a las diversas tecnologías desarrolladas durante la segunda y tercera revolución industrial. Sin embargo, estas tecnologías, generalmente basadas en la quema de combustibles fósiles como el carbón, gas y otros derivados del petróleo ha contribuido en gran medida a liberar a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono y otros contaminantes, que son dañinos para el ser humano y el medio ambiente.

En un contexto generalizado de concienciación hacia la sostenibilidad, el respeto al medio ambiente y con la meta de conseguir sistemas energéticos con mayor independencia de los combustibles fósiles, la innovación ya no se centra en conseguir el máximo confort a cualquier precio. El gran reto hoy en día es conseguir que los sistemas de confort de los edificios y viviendas sean eficientes, sostenibles y asequibles. Varias tecnologías han sido desarrolladas para este propósito, aunque su implantación es todavía limitada.

Como se ha indicado previamente, hoy en día las necesidades de confort están totalmente cubiertas. La meta hacia la que se debe tender ahora es la sostenibilidad. Como se puede apreciar en la **Ilustración 1**, el sector residencial es el 17% de la demanda energética total (IDAE, 2011), la cual es cubierta mayormente por combustibles fósiles.

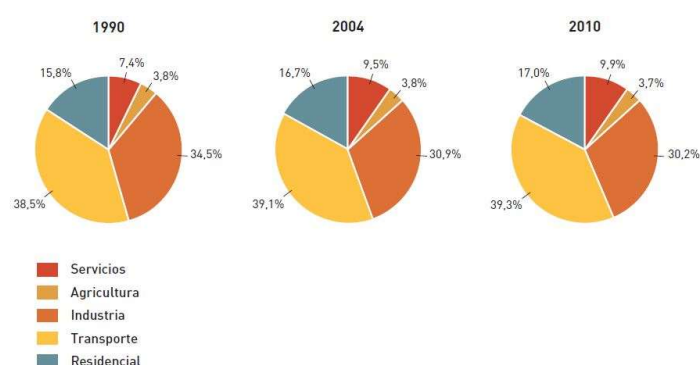


Ilustración 1: Demanda energética sectorial en España

Un estudio detallado de las necesidades térmicas de una vivienda junto con la utilización inteligente de las diversas tecnologías existentes ayudaría a reducir drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles, mayormente responsables de la contaminación y efectos sobre el clima.

Este proyecto pretende hacer un análisis del comportamiento térmico de una vivienda convencional, identificar los factores que provocan un consumo elevado de energía y proponer soluciones. Además, se propondrán sistemas de acondicionamiento alternativos a los basados en la quema de combustibles fósiles y tecnologías que ayudan a la autosuficiencia energética.

Asimismo, este proyecto trata de demostrar que la promoción de tecnologías limpias para el confort y el uso doméstico es posible desde el mismo individuo, sin tener que depender de campañas gubernamentales. Desde esa perspectiva, se pretende enumerar una serie de recomendaciones para avanzar hacia la generalización de las energías limpias.

En resumen, el objetivo de este proyecto es hacer una propuesta de conversión del sistema acondicionamiento de una vivienda estándar hacia un modelo más eficiente y sostenible. Para ello se estudiarán las diferentes tecnologías existentes, se modelará matemáticamente la vivienda, se harán una serie de propuestas, se llevará a cabo una evaluación de las propuestas y una elección de las tecnologías adecuadas.

OBJETIVOS

Los principales objetivos del proyecto son los siguientes:

- Identificar las carencias de los sistemas de acondicionamiento actuales en viviendas. Se trata de estudiar la eficacia de las viviendas en el aprovechamiento de la energía y determinar las carencias y errores que disminuyen la eficiencia. Se llevará a cabo mediante las simulaciones.
- Estudiar las alternativas sostenibles que existen. El objetivo es conocer las ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías para posteriormente determinar su conveniencia.
- Conocer las distintas soluciones en función del tipo de vivienda y de clima. Mediante simulación, se efectuará un análisis para sacar conclusiones de la posible viabilidad de las diversas tecnologías limpias.
- Disponer de una lista de recomendaciones para el ahorro energético y la promoción de las energías limpias. Estas recomendaciones están orientadas hacia el individuo, enfocadas a la promoción de las energías limpias en la privacidad y no mediante promociones públicas.

METODOLOGÍA / SOLUCIÓN DESARROLLADA

El proyecto se lleva a cabo mediante el estudio del comportamiento térmico de una vivienda con diseños basados en modelos matemáticos y el análisis de las diferentes soluciones existentes. No es un proyecto en el que se pretendan obtener resultados empíricos, si no que todo va a estar simulado mediante software. Por tanto, lo primero que se hace es una reflexión sobre qué técnica de modelado es más recomendable para el propósito. Se persigue obtener conclusiones bien fundamentadas con el modelo más simple posible.

En segundo lugar, se lleva a cabo una revisión de las tecnologías limpias anteriormente mencionadas para evaluar la conveniencia de su uso y en qué condiciones. A continuación, y tras sacar conclusiones de las simulaciones con los sistemas de acondicionamiento actuales, se estudia la viabilidad de las alternativas mediante simulación. Finalmente se proponen alternativas fundamentadas en los datos obtenidos.

RECURSOS Y HERRAMIENTAS EMPLEADAS

El software Matlab es la principal herramienta que se emplea. Es una herramienta idónea por su versatilidad y gran capacidad de cálculo. Cabe añadir que es un software muy ligado al entorno universitario, por lo que no es necesario una curva de aprendizaje.

Los modelos de simulación que se pretenden desarrollar son técnicas comunes en los análisis de ingeniería. Hay una extensa bibliografía que respalda estos métodos para el estudio del comportamiento térmico de un edificio (Chapman, 1984) (D.G & G.P, 1973) (Kusuda, 1969) (P.J.Lute, 1992) (Paassen, 1981). Asimismo, la mayoría de estas técnicas de simulación se llevan a cabo con Matlab en el ámbito universitario, por lo que se puede estar en gran medida seguro de la viabilidad de este recurso. Es necesario señalar que ya se han desarrollado algunos modelos en Matlab para comprobar la viabilidad de esta herramienta como principal medio de trabajo. Al mismo tiempo, ya se ha llevado a cabo la reflexión del modelo de simulación más conveniente, pues era necesario para comenzar a diseñar los modelos.

ESTUDIO DE LOS TRABAJOS Y TECNOLOGÍAS EXISTENTES

De un tiempo a esta parte, se ha hecho grandes esfuerzos en diferentes ámbitos para avanzar hacia un modelo de mix energético con una dependencia mínima de los combustibles fósiles. En cuanto a el acondicionamiento de edificios y hogares, las sedes de grandes empresas, edificios gubernamentales, universidades y pequeñas iniciativas privadas han llevado a cabo importantes avances. Varios son los estudios universitarios que han permitido analizar en detalle diferentes fuentes de energía y sistemas para ello (Gunerhan & Hepbasli, 2007) (Ozgener, Hepbasli, & Dincer, 2005) (Ozgener & Hepbasli, 2005).

Si evaluamos las técnicas que se han empleado hasta ahora, podemos observar que las tecnologías se utilizan de manera individualizada, dimensionando los equipos para cubrir las necesidades, aunque ello implique el desaprovechamiento de los recursos debido a una baja eficiencia.

Las tecnologías que se emplean hoy en día van desde los aislantes o las construcciones inteligentes hasta los sistemas de refrigeración y calefacción (HVAC).

Aislantes

Son esenciales para controlar los flujos de calor. Una construcción bien hecha debe tener los máximos niveles posibles de aislamiento con respecto al exterior. De esta manera se consigue que el esfuerzo térmico ejercido se aproveche al máximo. Es común encontrar grandes instalaciones HVAC que consumen una gran energía debido al mal aprovechamiento en el edificio del calor o frío generados.

Los aislantes tienen como objetivo principal el control de los flujos de energía, los cuales pueden expresarse mediante los procesos de intercambio de calor convencionales:

1. Conducción en sólidos.
2. Convención entre sólidos y fluidos.
3. Advección entre fluidos.
4. Radiación infra roja entre sólidos.
5. Radiación solar.

Mediante la expresión analítica de estos procesos se puede simular el comportamiento térmico de un edificio y, más en concreto, de una vivienda. En apartados siguientes se explicará de qué manera se ha llevado a cabo en este trabajo.

Arquitectura orientada a la eficiencia energética

Existen técnicas para conseguir aprovechar al máximo los recursos de los que se dispone. Dobles fachadas, acristalamientos sombreados o reflectantes, inercia térmica de la estructura, etc. Las más relevantes en una vivienda cara a llevar a cabo una transformación son los acristalamientos y el manejo de las inercias térmicas.

Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)

Son los encargados de suministrar aire en determinadas condiciones para conseguir los niveles de confort deseados. Son ampliamente empleados en grandes edificios no residenciales donde el sistema está centralizado. Sin embargo, pequeñas instalaciones similares se emplean en viviendas particulares para el mismo fin. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar un sistema completo centralizado que trata el aire entrante.

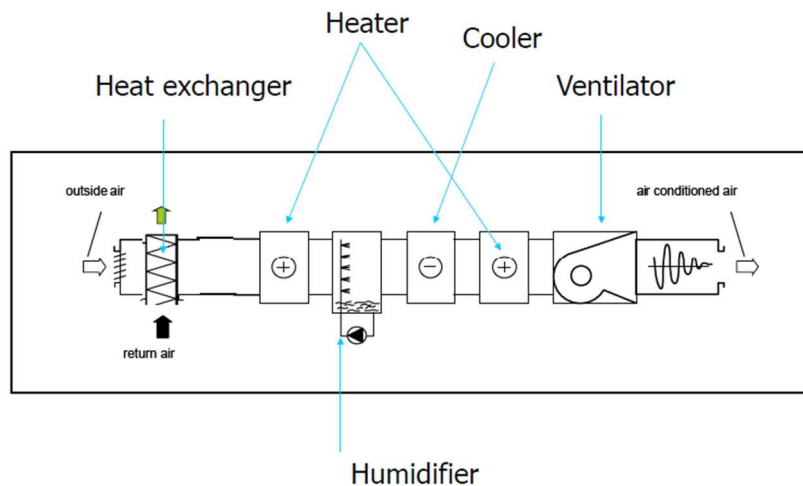


Ilustración 2: Sistema HVAC completo

Las opciones de sistemas de acondicionamiento son las siguientes:

- Calefacción mediante radiadores + ventilación natural. Se trata del sistema más simple de todos. En la mayoría de los casos se emplean ventiladores de extracción y suministro de rejillas. No se puede recuperar el calor. El enfriamiento se hace mediante la apertura de ventanas. No es muy eficaz en climas con altas temperaturas, ya que las estancias tienden a recalentarse y la gente responde tarde. La calefacción se realiza mediante un quemador de gas que suministra agua caliente a un circuito de radiadores.
- Calefacción mediante radiadores + ventilación controlada mediante la apertura de ventanas. Para el suministro de aire fresco se abren las ventanas. Durante el verano, cuando el edificio tiende a sobrecalentarse, las ventanas se abren completamente durante la noche para enfriar las paredes en el edificio, de modo que al día siguiente el exceso de calor durante el tiempo de oficina puede ser acumulado de nuevo. Al hacerlo,

la temperatura interior se mantiene dentro de niveles aceptables. Es necesario conocer el comportamiento térmico del edificio y su inercia térmica para aplicar un simple control predictivo.

- Calefacción mediante radiadores + sistema controlado de ventilación y enfriamiento. Se emplean 2 ventiladores centrales, uno para extraer el aire interior y otro para suministrarlo. Se suele instalar un recuperador de calor entre los dos flujos de aire. Para la refrigeración, el aire suministrado se enfría mediante un sistema de aire acondicionado.
- Unidad de tratamiento de aire para calefacción y refrigeración. Se utiliza agua caliente y fría suministrada por una unidad central que se transporta a cada estancia, donde mediante intercambio de calor se enfría o calienta el aire interior. Los sistemas de ventilación suministran el aire fresco necesario de manera controlada. De nuevo, un recuperador de calor se puede instalar entre la salida y entrada de aire para mayor eficiencia.

Otros sistemas de generación y aprovechamiento de energía

Existen diversas tecnologías que son empleadas para el mayor aprovechamiento de la energía o para la generación de energía limpia. La combinación de diversas tecnologías es la clave para conseguir una gran eficiencia y dejar de consumir combustibles fósiles.

- Bombas de calor: permiten transportar la energía tanto de dentro hacia fuera como de fuera hacia dentro con altos niveles de eficiencia. Existen aparatos de alta eficiencia con COP mayores de 5. Sin embargo, para los cálculos se supondrá disponer de uno con COP = 4, muy parecido a la mayoría de los aparatos disponibles en el mercado.
- Suelo radiante: permite no solo transportar calor con baja temperatura (lo que reduce sensiblemente pérdidas), sino también aporta inercia térmica al sistema. En lugar de calentar el aire, se calienta el suelo.
- Placas solares y aerogeneradores: permiten obtener energía de manera limpia y gratuita. La reciente bajada de precios debido a mejoras en su producción ha hecho que sean competitivos frente a la compra de electricidad a un proveedor.
- Motores de cogeneración: los motores de combustión obtienen una eficiencia de entre 25-35%. Sin embargo, si existe una demanda térmica, se puede recuperar gran parte del calor y emplearlo para otros fines.
- Buffers de calor: permiten almacenar energía obtenida en algún proceso, pero que no es necesaria en el instante en que es obtenida. Un uso inteligente de los buffers de calor permite maximizar el uso de la energía y reducir la dependencia del sistema.
- Colectores solares: Permiten transformar la radiación solar en energía térmica para almacenaje o uso. Generalmente se emplea para calentar agua y permite aprovechar un calor que se perdería rápidamente por el efecto del viento y de la temperatura exterior.
- Energía geotérmica: una energía muy poco convencional y costosa. Es, sin embargo, una gran fuente de energía térmica una vez hecha la inversión inicial.
- Intercambiador de calor con el subsuelo + bomba de calor: consiste en aumentar el rendimiento de las bombas de calor mediante el intercambio de calor con el subsuelo.

- Almacenamiento de energía en acuíferos: se trata del mismo concepto que los buffers de calor. Consiste en almacenar energía en los acuíferos del subsuelo para luego obtener una mayor eficiencia en las máquinas térmicas como los HVACs.
- Biomasa: consiste en obtener energía térmica a partir de la combustión de combustibles renovables como la madera.

Más adelante se describen las características de los equipos que se simulan y se explican las razones de la elección de dichos equipos.

Modelos matemáticos

Es un recurso muy poco extendido. El estudio de los flujos de calor y las necesidades térmicas de una vivienda puede ayudar a identificar los puntos por donde se pierde eficiencia. Además, ayudan a escoger la arquitectura más idónea en función del clima, y son necesarios para la elaboración de una estrategia en la que se maximicen los recursos disponibles en función de las necesidades.

BASE TEÓRICA

En este apartado se describen con detalle las bases teóricas de las que se parte para el desarrollo del proyecto. Primeramente, se describen algunos aspectos básicos de la teoría de confort, los cuales sirven de base para fijar las condiciones ambientales objetivo que debe haber en una vivienda. A continuación, se discuten las diferentes maneras de simular el comportamiento térmico de una vivienda y se aportarán argumentos a favor y en contra de las distintas alternativas.

Teoría de Confort

El objetivo de la teoría de confort es conocer las condiciones que hacen que en una estancia se esté confortable. La sensación de confort depende de muchos factores, tanto ambientales como de la propia persona.

En primer lugar, el propio cuerpo regula automáticamente la temperatura de manera muy efectiva. Cuando el cuerpo se calienta más de lo debido, dos procesos se inician para aumentar la pérdida de calor: vasodilatación y sudoración. De la misma manera, si el cuerpo se enfría, se produce la vasoconstricción y el aumento de la generación interna de calor. Aunque la sudoración y el aumento de generación de calor valgan para mantener la temperatura corporal, ambos fenómenos implican unas condiciones poco confortables, por lo que se precisa que no ocurran.

En segundo lugar, existen distintas variables que definen el confort. El cuerpo no siente la temperatura en sí, si no el ritmo de la pérdida de calor. Las variables que definen dicha pérdida son:

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| - Temperatura del aire. | - Temperatura media radiante. |
| - Humedad relativa. | - Ropa. |
| - Velocidad del aire. | - Metabolismo. |

Los rangos entre los que se encuentran las situaciones de confort se han determinado mediante un gran número de experimentos llevados a cabo con personas. Debido a que una persona puede tener diferentes criterios que otras, se trabaja con áreas de confort (Ilustración 3; Ilustración 4; Ilustración 5).

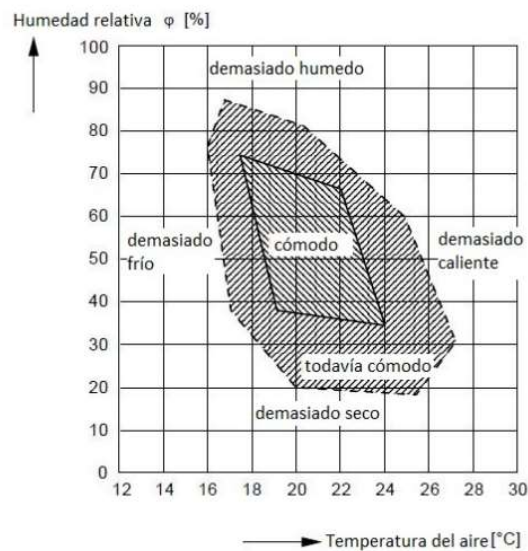


Ilustración 3: Área de confort de la temperatura ambiental con respecto a la humedad relativa`

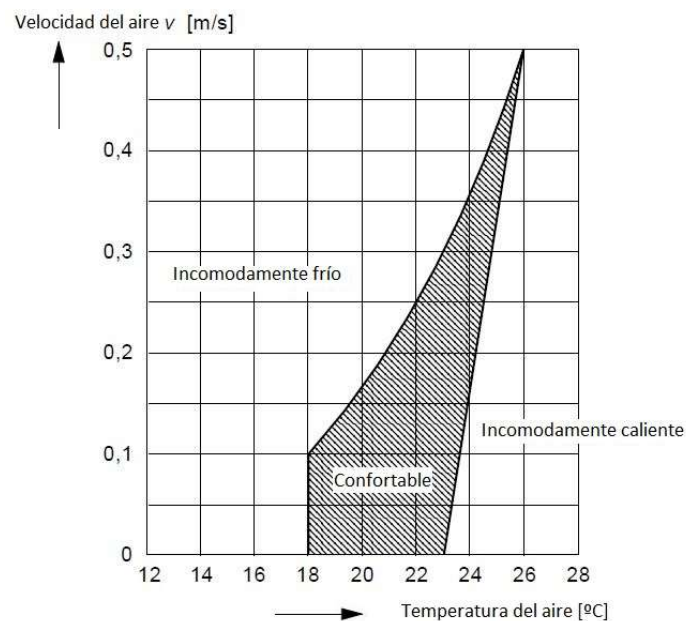


Ilustración 4: Área de confort de la temperatura del aire con respecto a la velocidad del aire.

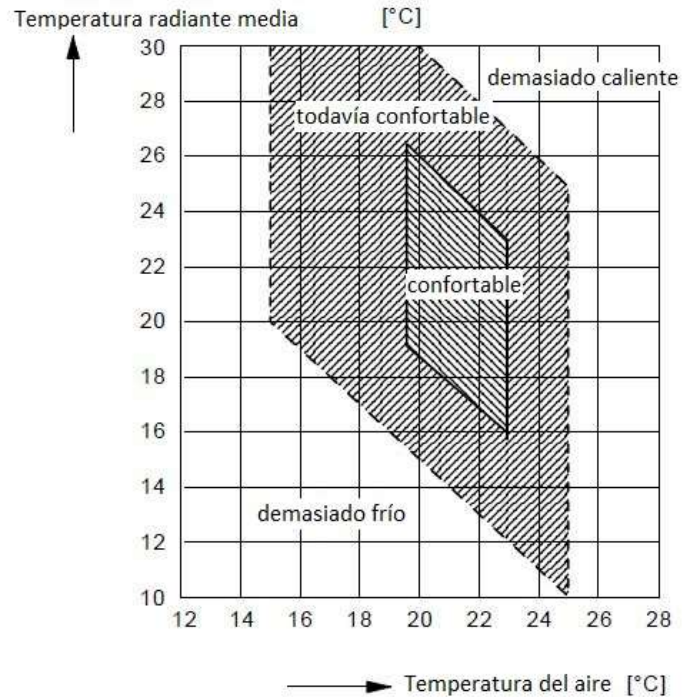


Ilustración 5: Área de confort de la temperatura del aire con respecto a la temperatura radiante media.

A pesar de que las variables ambientales del confort nos permiten gran maniobrabilidad, los equipos necesarios para controlar algunas de ellas son costosos y demasiado voluminosos para una vivienda, por lo que las variables de control del confort en este estudio son la temperatura ambiental y la temperatura media radiante (Ilustración 5).

Más restricciones podrían incluirse en el modelo de confort basadas en diversas teorías (Fanger, 1970) (Hardy, J.D., Gagge, A.P. Stolwijk, J.A., 1970) (Fanger, P. O., Ipson, B. M., Langkilde, G., Olesen, B. W., Christensen, N. K., & Tanabe, S., 1985) . Sin embargo, las dos variables principales (temperatura ambiental y media radiante) son las escogidas. Además, son las más fáciles de controlar mediante los medios de los que se disponen.

Modelado de una vivienda

Para poder diseñar un sistema de acondicionamiento de una vivienda, lo primero es saber las necesidades térmicas de la misma. A continuación, se estudian los recursos necesarios para abastecer la demanda.

En primer lugar, es necesario saber qué clase de modelo térmico se desea simular. Dependiendo de la complejidad, es posible sacar conclusiones más o menos precisas y con diferente nivel de detalle. En líneas generales, existen tres tipos de modelos, los cuales se describen a continuación:

- 1- Modelo estático de baja resolución. Se tienen en cuenta todos los flujos de calor entre la vivienda y el exterior. Se hace un solo balance de energía sobre un punto/nodo (la vivienda). Este modelo es bueno para hacer estimaciones iniciales y averiguar el orden de magnitud de las demandas térmicas, pero no correspondería a un estudio en profundidad.
- 2- Modelo dinámico de baja resolución. Similar al primero, se modela de forma brusca el comportamiento dinámico de la vivienda mediante estudios paramétricos previos. Este modelo es muy similar al anterior, con la única diferencia que se emplea en construcciones que tengan un gran comportamiento dinámico. Puede ser aplicado a edificios de gran masa o a construcciones antiguas.
- 3- Modelo dinámico de alta resolución. A partir de ciertas suposiciones, se determinan nodos en la vivienda (paredes, techo, suelo, cristales, aire, muebles, etc) y se simula la dinámica de la vivienda mediante el método de diferencias finitas y el método de respuesta de factores (Kusuda, 1969) (Stephenson & Militas, 1967). También pueden emplearse otros métodos como el de elementos finitos. Este modelo es idóneo para estudios detallados que buscan como objetivo sacar conclusiones más allá del dimensionamiento de instalaciones HVAC.

En este trabajo se ha empleado el último modelo, ya que los dos primeros carecen de una precisión necesaria para sacar unas conclusiones válidas.

Seguidamente, tras escoger el modelo que se va a desarrollar, se estudia la transferencia de calor, la cual ocurre de diferentes maneras. Para simplificar, es necesario suponer que una superficie tiene la misma temperatura en toda su área y que el aire tiene una temperatura homogénea. De esta manera, puede suponerse tanto una superficie como el aire nodos de una red térmica. Los mecanismos de transmisión de calor en una vivienda son los siguientes:

- Conducción en sólidos. Se produce en las paredes, suelos y techos. Existe una extensa bibliografía sobre la conducción en sólidos. Dependiendo del grosor de la pared, se considerará la transmisión de calor estática o dinámica. Simplificando, si la transferencia de calor es estática, el gradiente de temperatura en la pared será constante (la temperatura cambia linealmente). Por otro lado, si la variación de la temperatura es dinámica, el gradiente temperatura variará a lo largo del grosor de la pared. Suponiendo que la superficie de ambos lados tiene la misma temperatura en toda su área, la transferencia de calor será expresada de las siguientes maneras:

1. Para la expresión de la conducción de calor estática se usará la ecuación de transferencia de calor de Fourier:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = kA \frac{\theta_1 - \theta_2}{d}$$

Donde:

$Q_{1 \rightarrow 2}$ es el calor que se transmite a través del sólido.

k es la constante de conductividad térmica.

A es el área de conducción.

d es la anchura del sólido.

$\theta_1 - \theta_2$ incremento de temperaturas entre ambos lados de la pared.

2. Para la expresión de la conducción de calor dinámica se empleará la teoría de factores de respuesta. Este es un método útil para reducir la carga computacional que supondría el subdividir la pared en pequeños nodos. Además, incluye la acumulación de calor no despreciable que ocurre por la gran masa del sólido en cuestión.

Este método discretiza los pulsos de calor que se inyectan en el sólido a lo largo del tiempo (véase la **Ilustración 7: Respuesta de factores. Ilustración 7**). En esencia, describe el comportamiento térmico de una pared, pero no lo que ocurre dentro. Las suposiciones que se deben hacer son las siguientes:

- La transmisión de calor se produce en una sola dirección.
- La pared es homogénea. Para ello se escogerán parámetros que representen la pared en su conjunto.
- La serie temporal de temperaturas puede ser aproximada por los triángulos superpuestos de temperaturas con misma base, como muestra la **Ilustración 6**.

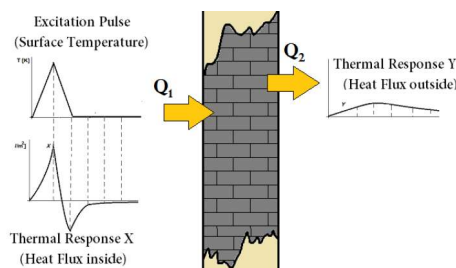


Ilustración 7: Respuesta de factores.

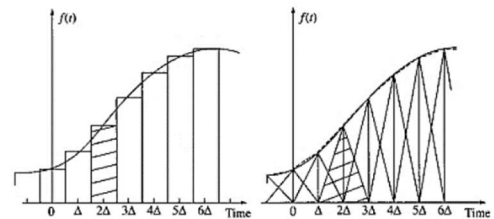


Ilustración 6: Serie temporal de temperatura.

La expresión que describen el flujo de calor es la siguiente:

$$Q_1 = \text{Área} \cdot \left[\sum_{i=0}^N X_i T_{in}^{t-i} - \sum_{i=0}^N Y_i T_{out}^{t-i} \right]$$

Donde:

Q_1 es el flujo de calor entrante en la pared.

X_i son los factores de respuesta a la entrada de la pared.

Y_i son los factores de respuesta a la salida de la pared.

T_{In}^{t-i} y T_{Out}^{t-i} son las temperaturas en las superficies de la pared.

Los factores de respuesta son característicos de cada pared y son calculados en función de las características físicas de dicha pared y del intervalo de tiempo de la simulación.

- Convección entre sólidos y fluidos. El intercambio de calor se supone estático, pues no hay elementos que conviertan al sistema en dinámico. La ecuación que expresa la convección es la siguiente:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \alpha_c A (\theta_1 - \theta_2)$$

Donde:

$Q_{1 \rightarrow 2}$ es el calor que se transmite a través del sólido.

α_c es el coeficiente de transferencia convectiva. En espacios interiores sin ningún flujo de aire tiene valor $\alpha_c = 1$; con flujo $\alpha_c = 7,5$; y en espacios abierto $\alpha_c = 25$.

A es el área de convección.

$\theta_1 - \theta_2$ incremento de temperaturas entre la superficie y el aire.

- Radiación infrarroja entre sólidos. Toda superficie emite radiación infrarroja. Si la temperatura de ambas superficies es diferente, se producirá una transferencia de calor. La ecuación que expresa dicha transferencia es la siguiente:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Donde:

$Q_{1 \rightarrow 2}$ es el calor que se transmite a través del sólido.

ε es el coeficiente de emisión.

A es el área de emisión.

σ es la constante de Stefan Boltzman = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]

T es la temperatura de la superficie.

Esta expresión se puede aproximar como:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \alpha_{rad} A_1 F_{1 \rightarrow 2} (\theta_1 - \theta_2)$$

Donde:

$Q_{1 \rightarrow 2}$ es el calor que se transmite a través del sólido.

α_{rad} es el coeficiente de transferencia.

A_1 es el área del área 1.

$F_{1 \rightarrow 2}$ es el factor de visión de la superficie 1 con respecto a la segunda.

$\theta_1 - \theta_2$ incremento de temperaturas entre ambas superficies.

La transmisión de calor puede ser asumida como constante en el rango normal de temperaturas de una estancia.

$$\alpha_s = \varepsilon \sigma (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_2^2 T_1 + T_2^3) \approx 4 \varepsilon \sigma T_{average}^3 \approx 5$$

- Radiación solar incidente en sólidos. Es la radiación que un objeto recibe procedente del sol. Puede ser expresada con la siguiente ecuación:

$$Q = DQ_{ze}A$$

Donde:

D es la absortancia solar.

Q_{ze} es la radiación solar por unidad de superficie en ese momento.

A es el área sobre la que incide la radiación.

A continuación, se diseña el modelo térmico de la vivienda. Para ello es aconsejable seguir una serie de pasos para que el modelo sea fiel a la realidad bajo una serie de suposiciones.

- 1- Propósito. Es preciso definirlo bien, pues no es lo mismo tratar de diseñar el sistema de calefacción que el de aire acondicionado. Las suposiciones variarán con respecto al propósito.
- 2- Límites de los sistemas. No es lo mismo un estudio de un piso rodeado por otros que el de una casa individual.
- 3- Desarrollar los conceptos del modelo. Describir las dinámicas y características relevantes de la vivienda. Por ejemplo, en qué dirección está construida la vivienda, cuanta radiación solar recibe, si existen flujos de aire en la vivienda, de qué materiales está construida, qué tipo de acristalamiento tiene, etc.
- 4- Suposiciones. Es importante definir bien las suposiciones que dan lugar a un modelo más simplificado. Por ejemplo, las realizadas en los mecanismos de transmisión de calor, que tienen como objetivo linealizar las ecuaciones.
- 5- Subdividir el sistema en ventanas, paredes, suelo, techo, aire, cortinas, etc.
- 6- Ecuaciones matemáticas que describan linealmente la transferencia de calor entre cada elemento del sistema con los demás. Para cada nodo se debe cumplir la ley de la conservación de la energía. Resolviendo el sistema se obtienen las variables que no se conocen en el (temperaturas y demanda térmica).
- 7- Cálculo de los valores iniciales para iniciar la simulación. Se pueden suponer dentro de un rango de valores lógico.
- 8- Simulación en Matlab. A partir de una base de datos de las condiciones meteorológicas se simula el sistema para cada diferencial de tiempo y se obtiene la demanda térmica en cada momento. Dado que el sistema no es excesivamente rápido y que se disponen de datos cada hora, el sistema se resolverá para cada hora.
- 9- Validación del modelo. Se debe comprobar que los resultados obtenidos de la simulación son correctos. Se debe atender a cualquier valor que no tenga sentido y comparar los resultados con los de una vivienda de características similares. Si existe algún error se corrige; si los resultados no tengan sentido, se revisará el modelo atendiendo a la ley de la conservación de la energía para localizar los posibles errores.

CAPÍTULO II – MODELADO DEL SISTEMA

Este capítulo detalla el modelado matemático de una vivienda estándar con el fin de llevar a cabo simulaciones del comportamiento térmico de esta. En primer lugar, se determinará qué vivienda es la que se va a modelar y se seguirán una serie de pasos descritos anteriormente en Modelado de una vivienda.

VIVIENDA

El objetivo de este estudio es hacer una propuesta de conversión energética. Si una propuesta es válida para una vivienda estándar de dos habitaciones, también lo será para una vivienda de mayor tamaño que necesite menor aporte energético por persona. En consecuencia, la vivienda elegida es lo más sencilla posible. El modelo escogido es como el que se aprecia en la Ilustración 8, con la cara a la que pertenece la cocina, salón y corredor orientada hacia el sur.



Ilustración 8: Plano de una vivienda estándar

PROPÓSITO

El propósito ya ha sido bien definido anteriormente. Sin embargo, es conveniente decir que debido a que se la simulación tiene como base de datos los correspondientes al clima holandés, los parámetros escogidos serán los propios de este país, y las suposiciones que se hacen concuerdan con las condiciones del lugar. Por ejemplo: los valores de los aislantes se cogerán de las normativas propias de Países Bajos (hoy en día equivalentes en toda Europa); las suposiciones tendrán en cuenta que no se alcanzan grandes temperaturas en verano; en Holanda no se usan persianas, sino cortinas de gran grosor; etc. Los motivos de haber escogido este set de datos son dos: es representativo del clima europeo donde se concentra el gasto de combustibles fósiles para calefacción; ya ha sido utilizado para diferentes estudios y es aceptado por la comunidad científica como representativo. Además, este clima es representativo de la parte norte de España, por lo que es aplicable ahí.

LÍMITES DEL SISTEMA Y CONCEPTOS DEL MODELO

La mayoría de la población en el Randstad holandés (así como en la mayoría de los barrios de clase media en Europa) no posee una vivienda unifamiliar, sino que varias viviendas están agrupadas en edificios residenciales estilo “*dwelling*”, como se puede apreciar en la Ilustración 9.



Ilustración 9: Viviendas típicas urbanas en Holanda.

Esta agrupación provoca que gran parte de la vivienda esté protegida, ya que linda con las demás. En este caso, y siguiendo el estilo local, la cara sur y norte estarán anexas a las demás viviendas, mientras que la cara este y oeste darán al exterior. En cuanto al techo y el suelo, esta vivienda se supone la correspondiente al último nivel. Por tanto, el suelo se corresponderá con el techo de la vivienda inferior y el techo dará al exterior.

Por otro lado, el modelo supone que la vivienda tiene las siguientes características:

- Todas las ventanas tienen el mismo tipo de acristalamiento. Este será de doble cristal.
- No existen persianas que den al exterior. En su lugar, cortinas de gran grosor se colocan inmediatamente después de los cristales, como ocurre en gran parte de Europa.

- Los flujos de aire entre estancias dependerán de la diferencia de temperatura del aire entre estas. En el caso de la ventilación, si la hubiere, se supondrán valores de 5m/s referencia, un valor menor que los 8-10m/s de velocidad media del aire en el exterior.
- La radiación recibida es la correspondiente al set de datos del clima neerlandés (deBilt, 1964-1965).
- Los materiales no corresponden a una nueva construcción, sino que cumplen estándares más antiguos, correspondientes a los años 70 y anterior (Höglung, Mitalas, & Stephenson, 1966).

SUPOSICIONES

Las suposiciones que se tienen en cuenta para la elaboración del modelo y la simulación son las siguientes:

- El aire de la ventilación natural viene de fuera, por lo que su temperatura es la del aire exterior. Hay un intercambiador de calor para aumentar la eficiencia en caso de que sea necesario.
- Se asumen infiltraciones de aire nulas, pues la primera medida que en toda vivienda se debería tomar es eliminarlas.
- Los valores de los coeficientes de calor convectivos son 7,5 para el interior y 25 para el exterior.
- El coeficiente de radiación se ha calculado con el Uvalue (0.38 para una ventana eficiente) de una ventana de doble acristalamiento y es igual a 4,8 W/m²K. Ese valor, al pertenecer a una ventana eficiente es extensible al resto de superficies.
- La cantidad de aire por persona y hora necesaria para la ventilación es de 36 m³. Sin embargo, al tratarse de una vivienda con únicamente 2 personas, podrá omitirse en la simulación, ya que esos valores son empleados para edificios donde se concentra una cantidad de gente mucho mayor en sitios cerrados.
- El aire interior de la habitación tiene la misma temperatura en todas partes y puede ser representado por un punto (nodo) que puede ser caracterizado por un balance de calor. La misma hipótesis se hace para la superficie del piso, techo, persianas y acristalamientos.
- El calor específico del aire es despreciable.
- Las paredes, techo y suelo no muestran un gradiente de temperatura, sino que se supone una misma temperatura para toda la superficie.
- Los coeficientes de transferencia de calor son constantes.
- Se supone que el intercambio de aire entre la habitación y el espacio entre la cortina y el acristalamiento tiene una velocidad de 0,1 m/s y la distancia entre la ventana y la persiana solar es de 10 cm aproximadamente. Esto podrá ser ignorado si en el modelo se suponen las cortinas recogidas.
- Se asume que las ventanas tienen una altura de 2 metros.
- Los factores de visión entre estancias se suponen nulos, puesto que el intercambio de calor entre ellas se produce, en su inmensa mayoría, por convección del aire.

- Scripts de clases: se empleará la clase “Estancia” creada para este proyecto (véase en el Anexo el apartado Código).
- Script de simulación: contiene el código responsable de simular el comportamiento térmico de la vivienda durante un año (véase en el Anexo el apartado Código).
- Script de parámetros: contiene la inicialización de todas las variables. El script de simulación depende de él.

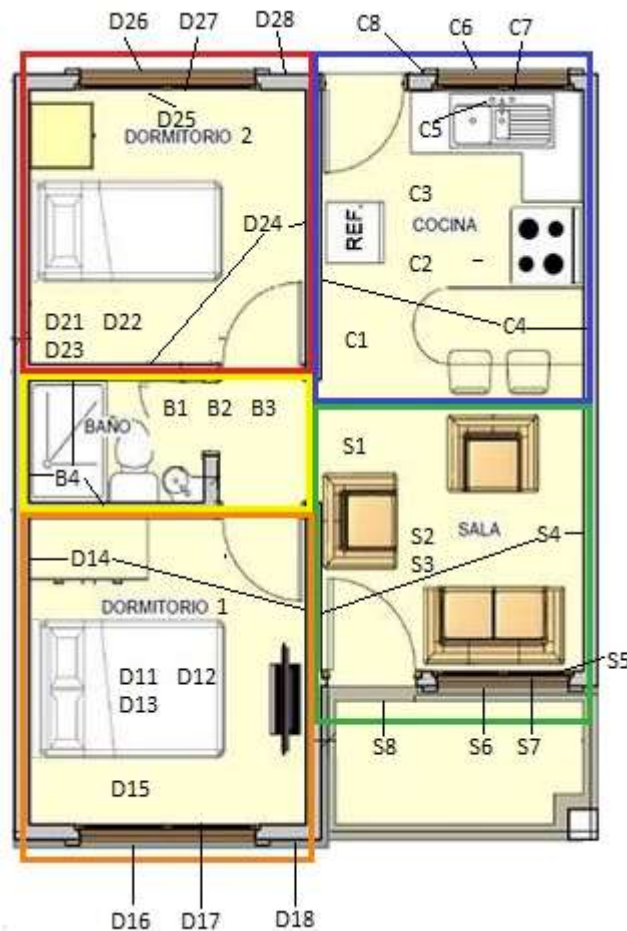


Ilustración 11: Red de nodos de la vivienda

Finalmente, se establecen los valores de los coeficientes que caracterizan la vivienda. La Tabla 1 muestra los valores escogidos. Nótese que en algunos símbolos se incluyen las notaciones convencionales en primer lugar y las que se han empleado en el código (para mayor comodidad del autor).

Tabla 1: Parámetros generales del modelo

Símbolos	Coeficiente	Dimensión	Valor
θ_x	Temperatura nodo x	[°C]	-
A_5	Absorción cristal interior	[-]	0.13 0.1
A_6	Absorción cristal exterior	[-]	0.16 0.13
h_{IN}/α_{IN}	Coeficiente de convección interior	[W·m²/K]	7.5
h_{OUT}/α_{OUT}	Coeficiente de convección exterior	[W·m²/K]	25
ϵ / α_{RAD}	Coeficiente de emisividad de radiación térmica	[W·m²/K]	4.8

α_{flujo}	Coeficiente de flujo de aire entre ventana y cortina	[Kg/(h·m ²)]	21.6/ -
A_{Techo}	Área del techo	[m ²]	-
$A_{Ventana}$	Área Ventana	[m ²]	-
A_{Suelo}	Área del suelo	[m ²]	-
A_{PF}	Área de la pared de la fachada	[m ²]	-
A_{PI}	Área de la pared interior	[m ²]	-
M_{Aire}	Masa de aire ventilado	[Kg/h]	50
$\eta_{Ventilación}$	Eficiencia de la recuperación de calor	[-]	70%
C_p	Calor específico del aire	[KJ/Kg]	1
R_p	Resistencia de la pared	[m ² ·K/W]	4
Q_{IN}	Calor aportado al nodo por la calefacción	W	-
α / D	Absortancia de las superficies	[-]	-

ECUACIONES

Con el objetivo de no repetir innecesariamente conceptos y ecuaciones que son comunes a todas las estancias de la vivienda, se describen los flujos de calor en una estancia tipo. Esta habitación estándar incluye todos los flujos de calor que encontramos en la vivienda, por lo que no todos se encuentran en todas las estancias.

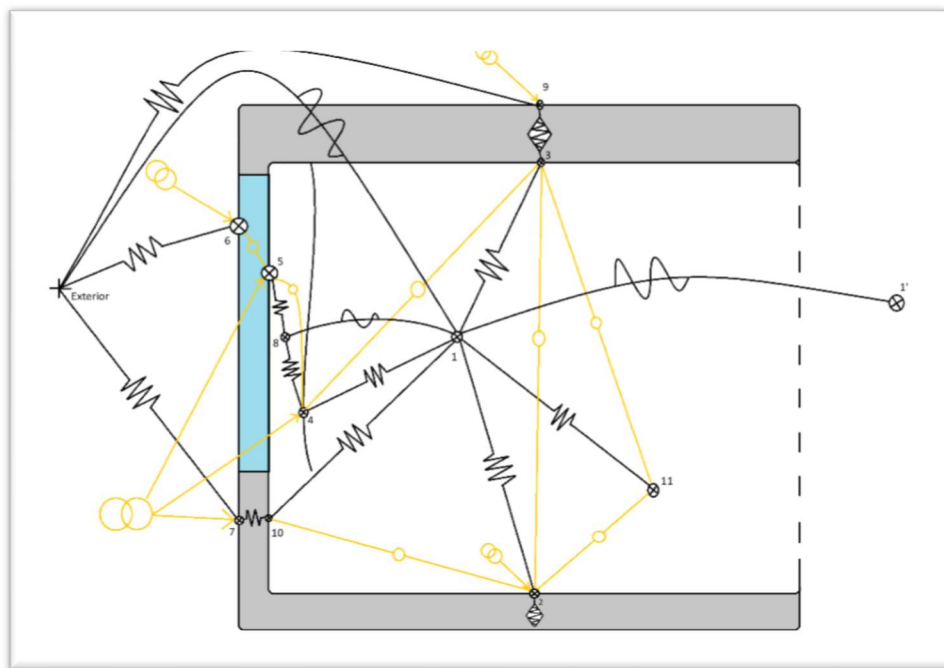


Ilustración 12: Esquema de nodos

Los flujos de calor se producen en forma de radiación, convección y conducción. El comportamiento dinámico se produce en el suelo y entre el techo y el tejado. El método de factores de respuesta se aplicará de dos maneras diferentes:

1. Suelo: sólido de anchura infinita. No se observan factores de respuesta en el otro lado. El cálculo de los factores será de la siguiente manera:

$$X_0 = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{k\rho C}{\Delta t}}; \quad X_n = -X_0 \cdot (2n - n + 1 - n - 1); \quad n > 0$$

Los factores $n > 0$ se deben corregir:

$$Error = \sum_{n=0}^{N-1} X_n; \quad X_{n,corrected} = X_n - \frac{Error}{n-2}; \quad n \geq 2$$

Para calcular el número de factores a calcular suponemos un grosor de 0.28m, por lo que el número de ellos serán $N = 50 \cdot d - 2 = 50 \cdot 0.28 - 2 = 12$.

Tabla 2: Factores de respuesta del suelo

1	2	3	4	5	6
3.9145	-2.2930	-0.3773	-0.1953	-0.1248	-0.0886
7	8	9	10	11	12
-0.0672	-0.0532	-0.0435	-0.0364	-0.0310	-0.0269

2. Techo: los factores de respuesta que se emplearán serán los obtenidos de un estudio sobre flujos de calor en tejados planos (Höglung, Mitalas, & Stephenson, 1966). El estudio está realizado en los años 60, por lo que concuerda con el tipo de vivienda para el que se quiere proponer una conversión.

Los intercambios de calor en cada nodo se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

Nodo 1: Aire

- 1-3: $\alpha_{IN} \cdot A_{Techo} \cdot (\theta_1 - \theta_3)$
- 1-4: $\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_1 - \theta_4)$
- 1-2: $\alpha_{IN} \cdot A_{Suelo} \cdot (\theta_1 - \theta_2)$
- 1-11: $\alpha_{IN} \cdot A_{PF} \cdot (\theta_1 - \theta_{11})$
- 1-10: $\alpha_{IN} \cdot A_{PI} \cdot (\theta_1 - \theta_{10})$
- 1-1': $M_{Aire} \cdot C_p \cdot (\theta_1 - \theta_{1'})$
- 1-Exterior: $(1 - \eta_{Ventilación}) \cdot M_{Aire} \cdot C_p \cdot (\theta_1 - \theta_{Exterior})$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\alpha_{IN} \cdot A_{Techo} \cdot (\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_1 - \theta_4) + \alpha_{IN} \cdot A_{Suelo} \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \alpha_{IN} \cdot A_{PF} \cdot (\theta_1 - \theta_{11}) + \alpha_{IN} \cdot A_{PI} \cdot (\theta_1 - \theta_{10}) + M_{Aire} \cdot C_p \cdot (\theta_1 - \theta_{1'}) - M_{Aire} \cdot C_p \cdot (\theta_1 - \theta_{Exterior}) = Q_{IN}$$

Nodo 2: Suelo

- 2 – 1: $\alpha_{IN} \cdot A_{Suelo} \cdot (\theta_2 - \theta_1)$
- 2 – 3: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-3}(\theta_2 - \theta_3)$
- 2 – 11: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-11}(\theta_2 - \theta_{11})$
- 2 – 10: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-10}(\theta_2 - \theta_{10})$
- 2 – Suelo: $A_{Suelo} (X_0 \cdot \theta_2^t + \sum_{i=1}^N X_i \cdot \theta_2^{t-i})$
- Radiación solar: $-Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot (1 - A_5) \cdot D_2 \cdot A_{Suelo}$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\begin{aligned} & \alpha_{IN} \cdot A_{Suelo} \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-3}(\theta_2 - \theta_3) + \alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-11}(\theta_2 - \theta_{11}) \\ & + \alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-10}(\theta_2 - \theta_{10}) + A_{Suelo} \left(X_0 \cdot \theta_2^t + \sum_{i=1}^N X_i \cdot \theta_2^{t-i} \right) \\ & - Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot (1 - A_5) \cdot D_2 \cdot A_{Suelo} = 0 \end{aligned}$$

Nodo 3: Techo

- 3 – 4: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-4}(\theta_3 - \theta_4)$
- 3 – 2: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-2}(\theta_3 - \theta_2)$
- 3 – 1: $\alpha_{IN} \cdot A_{Techo} \cdot (\theta_3 - \theta_1)$
- 3 – 10: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-10} \cdot (\theta_3 - \theta_{10})$
- 3 – 11: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-11} \cdot (\theta_3 - \theta_{11})$
- 3 – 9: $A_{Techo} (\sum_{i=0}^N X_i \cdot \theta_3^{t-i} - \sum_{i=0}^N Y_i \cdot \theta_9^{t-i})$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\begin{aligned} & \alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-4}(\theta_3 - \theta_4) + \alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-2}(\theta_3 - \theta_2) + \alpha_{IN} \cdot A_{Techo} \\ & \cdot (\theta_3 - \theta_1) + \alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-10} \cdot (\theta_3 - \theta_{10}) + \alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \\ & \cdot F_{3-11} \cdot (\theta_3 - \theta_{11}) + A_{Techo} \left(\sum_{i=0}^N X_i \cdot \theta_3^{t-i} - \sum_{i=0}^N Y_i \cdot \theta_9^{t-i} \right) = 0 \end{aligned}$$

Nodo 4: Cortinas

- 4 – 3: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-3}(\theta_4 - \theta_3)$
- 4 – 1: $\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_4 - \theta_1)$
- 4 – 8: $\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_4 - \theta_8)$
- 4 – 5: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-5}(\theta_4 - \theta_5)$
- Radiación solar: $Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot (1 - A_5) \cdot A_{Ventana}$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\begin{aligned} & \alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-3}(\theta_4 - \theta_3) + \alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_4 - \theta_1) + \alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_4 - \theta_8) \\ & + \alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-5}(\theta_4 - \theta_5) - Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot (1 - A_5) \cdot A_{Ventana} \\ & = 0 \end{aligned}$$

Nodo 5: Cristal interior

- 5 – 6: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-6}(\theta_5 - \theta_6)$
- 5 – 8: $\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_5 - \theta_8)$
- 5 – 4: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-4}(\theta_5 - \theta_4)$
- Radiación solar: $Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot A_5 \cdot A_{Ventana}$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-6}(\theta_5 - \theta_6) + \alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_5 - \theta_8) + \alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-4}(\theta_5 - \theta_4) - Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot A_5 \cdot A_{Ventana} = 0$$

Nodo 6: Cristal exterior

- 6 – Exterior: $\alpha_{Out} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_6 - \theta_{EXT})$
- 6 – 5: $\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{6-5}(\theta_6 - \theta_5)$
- Radiación solar: $Q_{SOL} \cdot A_6 \cdot A_{Ventana}$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\alpha_{Out} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_6 - \theta_{EXT}) + \alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{6-5}(\theta_6 - \theta_5) - Q_{SOL} \cdot A_6 \cdot A_{Ventana} = 0$$

Nodo 7: Pared exterior

- 7 – Exterior: $\alpha_{Out} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_7 - \theta_{EXT})$
- 7 – 10: $R_p \cdot A_{PF} \cdot (\theta_7 - \theta_{11})$
- Radiación solar: $-Q_{SOL} \cdot A_{PF}$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\alpha_{Out} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_7 - \theta_{EXT}) + R_p \cdot A_{PF} \cdot (\theta_7 - \theta_{11}) - Q_{SOL} \cdot A_{PF} = 0$$

Nodo 8: Aire entre las cortinas y la ventana

- 8 – 5: $\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_8 - \theta_5)$
- 8 – 4: $\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_8 - \theta_4)$
- 8 – 1: $M_{Aire\ ventana} \cdot C_p \cdot (\theta_8 - \theta_{Exterior})$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_8 - \theta_5) + \alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} \cdot (\theta_8 - \theta_4) + M_{Aire\ ventana} \cdot C_p \cdot (\theta_8 - \theta_{Exterior}) = 0$$

Nodo 9: Tejado

- 9 – 3: $A_{Techo} \left(\sum_{i=0}^N Y_i \cdot T_9^{t-i} - \sum_{i=0}^N X_i \cdot T_3^{t-i} \right)$
- 9 – Exterior: $\alpha_{Out} \cdot A_{Techo} \cdot (\theta_9 - \theta_{EXT})$
- Radiación solar: $-Q_{SOL} \cdot A_{Techo}$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$A_{Tec} \left(\sum_{i=0}^N Y_i \cdot T_9^{t-i} - \sum_{i=0}^N X_i \cdot T_3^{t-i} \right) + \alpha_{out} \cdot A_{Techo} \cdot (\theta_9 - \theta_{EXT}) - Q_{SOL} \cdot A_{Techo} = 0$$

Nodo 10: Parte interior de la fachada

- 10 – 3: $\alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-3} \cdot (\theta_{10} - \theta_3)$
- 10 – 2: $\alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-2} (\theta_{10} - \theta_2)$
- 10 – 1: $\alpha_{IN} \cdot A_{PF} \cdot (\theta_{10} - \theta_1)$
- 10 – 7: $R_p \cdot A_{PF} \cdot (\theta_{10} - \theta_7)$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-3} \cdot (\theta_{10} - \theta_3) + \alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-2} (\theta_{10} - \theta_2) + \alpha_{IN} \cdot A_{PF} \cdot (\theta_{10} - \theta_1) + R_p \cdot A_{PF} \cdot (\theta_{10} - \theta_7) = 0$$

Nodo 11: Pared interior

- 11 – 1: $\alpha_{IN} \cdot A_{PI} \cdot (\theta_{11} - \theta_1)$
- 11 – 2: $\alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-2} (\theta_{11} - \theta_2)$
- 11 – 3: $\alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-3} \cdot (\theta_{11} - \theta_3)$

Equilibrio de energías en el nodo:

$$\alpha_{IN} \cdot A_{PI} \cdot (\theta_{11} - \theta_1) + \alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-2} (\theta_{11} - \theta_2) + \alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-3} \cdot (\theta_{11} - \theta_3) = 0$$

SIMULACIÓN

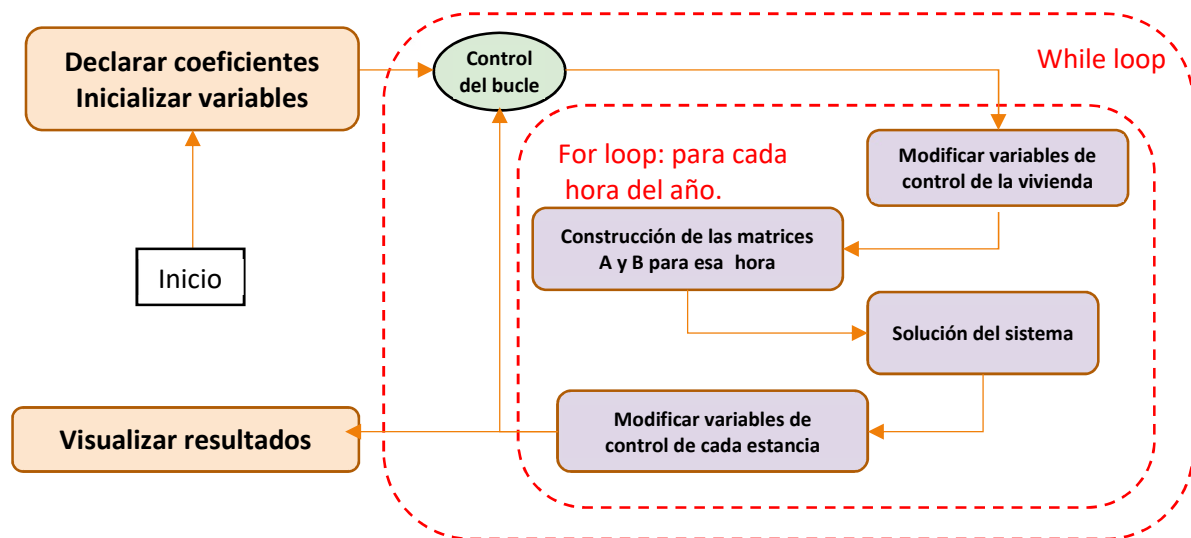
El objetivo principal del acondicionamiento es mantener la temperatura interior de la habitación entre un rango de temperaturas [20, 25]°C. Para ello, la referencia de la simulación será la temperatura del aire de las estancias, y lo que se pretende obtener es la demanda térmica de estas y las temperaturas de los nodos. En segundo lugar, se comprobará si las condiciones aportan un confort suficiente.

El cálculo de las temperaturas resultantes de las condiciones ambientales (temperatura exterior, radiación solar, aportación de calor del sistema de acondicionamiento) se lleva a cabo mediante la construcción de unas matrices A y B que describen el sistema y mediante las cuales se resuelve el sistema de ecuaciones lineales simultáneamente. El sistema tendrá la forma $[A][T] = [B]$, donde T es el vector de temperaturas de los nodos excepto la del aire, que es la temperatura por controlar. En su lugar se incluye la energía necesaria a aportar para fijar la temperatura del aire según la referencia. La primera matriz A contiene los coeficientes que multiplican a las temperaturas de los nodos, mientras que B contiene los valores independientes del sistema: radiación solar, ganancias internas de calor, temperatura exterior y la temperatura del aire interior, que es la referencia del sistema.

Según las ecuaciones descritas en el apartado anterior, las matrices tendrían la forma que se aprecia en el anexo

Matrices. Estas cambiarán ligeramente según se considere que las cortinas estén echadas o no.

Siendo la temperatura de las habitaciones el punto de referencia, y estando éste en un intervalo de temperaturas consideradas de confort, la simulación trata de minimizar el gasto energético manteniendo las temperaturas dentro de dicho intervalo. Por tanto, los cálculos se realizarán dentro de un bucle que incrementará o disminuirá la temperatura de referencia según la refrigeración o calefacción demandada.



CAPÍTULO III –SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este apartado describe y analiza los resultados de las simulaciones más representativas de los diferentes casos. A partir de ellas se deben identificar y justificar las características que disminuyen las necesidades de acondicionamiento de una casa.

CASO BASE: VIVIENDA TIPO

En primer lugar, se lleva a cabo una simulación inicial en la que se pretende controlar la temperatura durante todo el día, con unos parámetros de construcción propios de una vivienda construida en los años 70 ($R_p = 2.68$) y sin control de cortinas según la radiación solar existente. También se ha supuesto la presencia de 2 personas. En el caso en que vivieran más, la necesidad de calefacción sería menor. Por último, en esta casa se suponen las infiltraciones nulas, aunque las construcciones de más de 30 años tienen valores significativos de este tipo de pérdidas energéticas (alrededor de 0.5 veces el volumen de aire por hora), especialmente en invierno. Se supone la eliminación de infiltraciones como la medida básica a implementar en este tipo de conversiones.

Debido al clima de Países Bajos, la demanda de refrigeración (en azul en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) es prácticamente nula, y las temperaturas no alcanzan valores altos en verano a excepción de días concretos, por lo que se debe hacer un análisis de la conveniencia de aparatos de refrigeración. En esos días también se necesita aporte de calor durante la noche si se pretende mantener climatizado en todo momento la vivienda, aunque con unos hábitos responsables ese gasto se podría eliminar. El clima de Países Bajos, con respecto a la calefacción, es bastante similar al del Norte de España, y se dan similares demandas energéticas a lo largo del año en ambos lugares. En el resto de las estaciones el aporte energético está orientado a mantener la temperatura por encima de los 20°C en el interior. Apréciase en las siguientes figuras (Figura 1, Figura 2, Figura 3 y Figura 4):

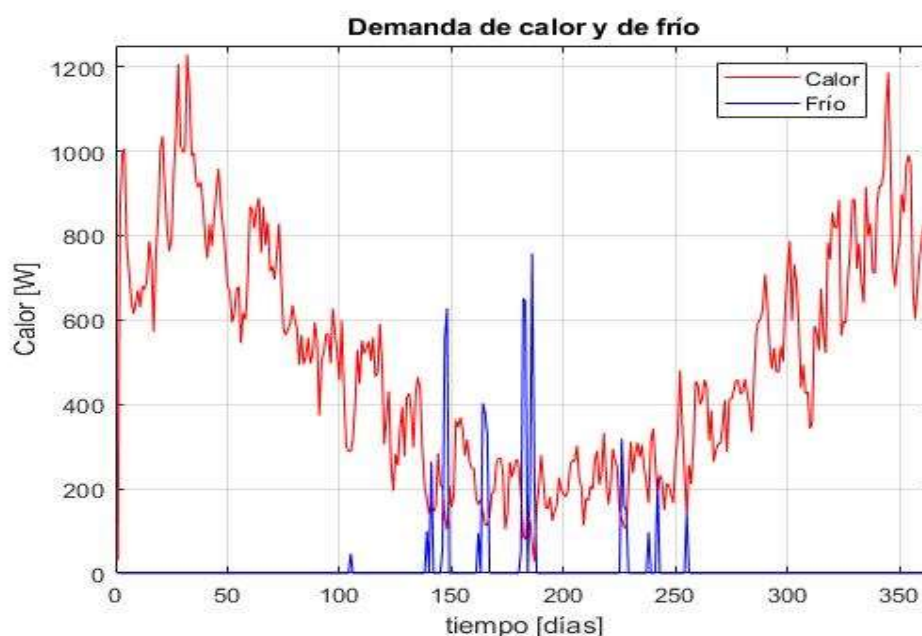


Figura 1: Demanda energética sim.1

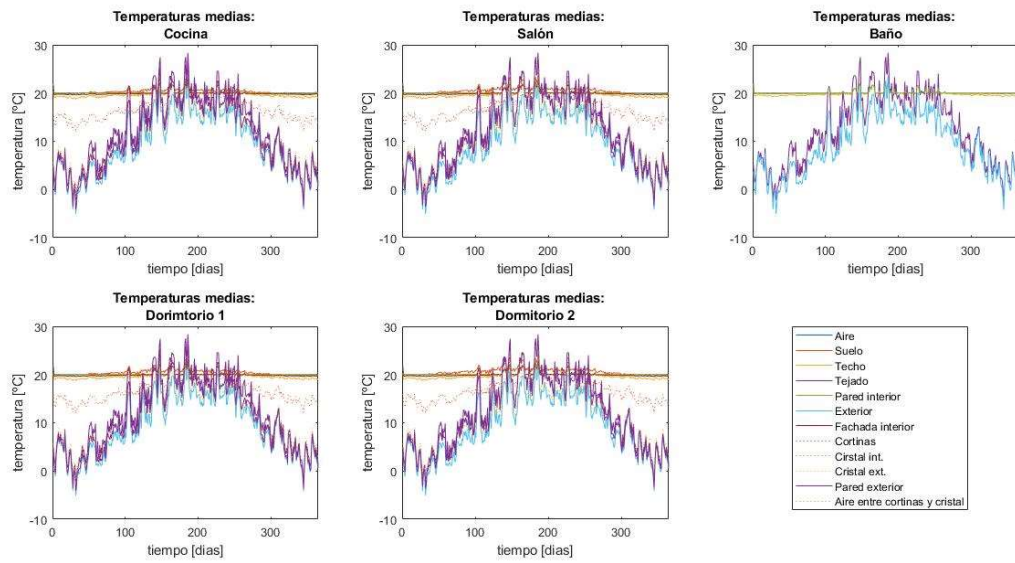


Figura 2: Temperaturas estancias sim. 1.

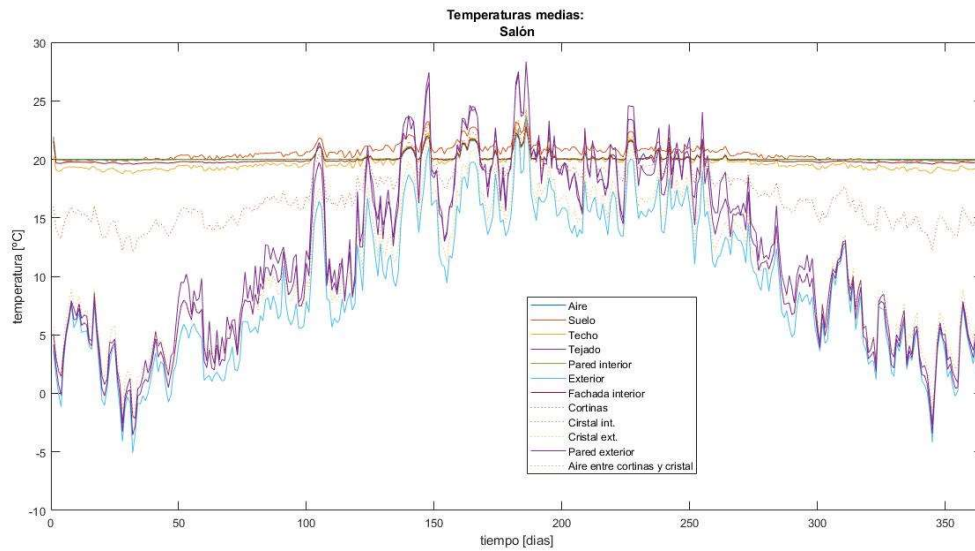


Figura 3: Temperaturas nodos del salón sim. 1.

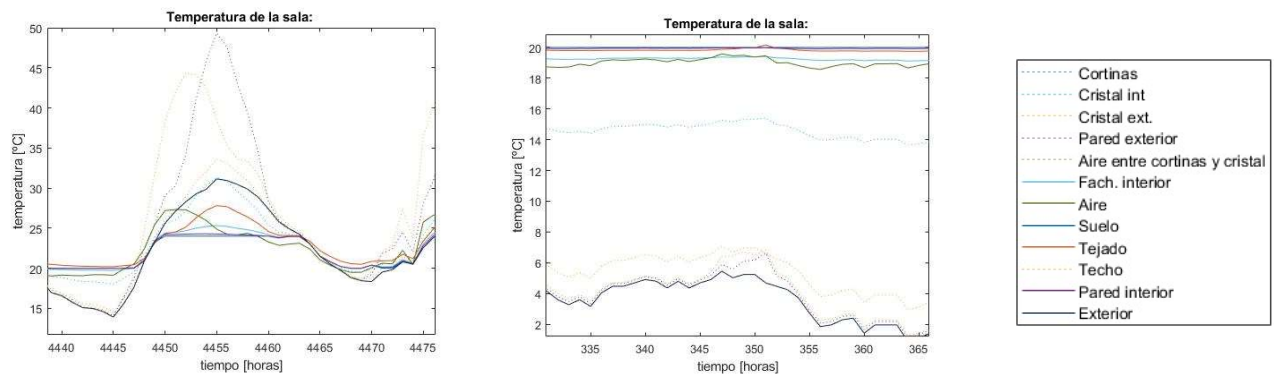


Figura 4: Temperaturas de un día de verano e invierno sim. 1

La demanda térmica total, siendo un caso deliberadamente exagerado en el que se acondicionan todas las habitaciones y en todo momento del año, es de $4,37\text{MW}\cdot\text{h}$ (unos $100\text{KWh}/\text{m}^2$). Teniendo en cuenta que la demanda de calefacción en Países Bajos se sitúa entre los 5 y los $30\text{MW}\cdot\text{h}$ por vivienda, este es un valor más que aceptable (hay que tener en cuenta que no hay infiltraciones, lo cual es usual en viviendas de más de 20 años). Sin embargo, lo que pretende este apartado es identificar cómo se puede reducir la pérdida de energía en la vivienda, no dimensionar los aparatos de acondicionamiento (se tratará más tarde). El valor es más grande de lo que una vivienda normal gastaría, ya que se acondiciona la vivienda todas y cada una de las horas del día durante todo el año y no se emplean las cortinas para aislar durante la noche.

En cuanto a las deficiencias de los materiales, es necesario fijarse por dónde pierde calor la casa. Las superficies que presenten más diferencia de temperatura con respecto a la del interior, y que se acerquen más a la exterior, serán por donde el calor fluya con mayor facilidad. En este caso, serán, de mayor a menor pérdida: acristalamientos, techo y fachada.

Las ventanas son de doble acristalamiento, lo cual evita los puentes térmicos y la conducción del calor. Para una mayor eficiencia, sería necesario tener un tercer acristalamiento o emplear cortinas/persianas para aislar más en las horas en las que no hay luz. En cuanto a las paredes y techo, se pueden emplear otros materiales con mejor aislamiento térmico. Esta simulación se ha llevado a cabo con un valor de resistencia de la pared de $2,68\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, pero actualmente existen materiales que sobrepasan los $8\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, valores que se pueden considerar propios de una vivienda térmicamente pasiva.

A continuación, se plantearán 2 escenarios diferentes para comprobar los beneficios de incrementar la resistencia de las paredes (y techo) y el aislamiento que proporcionan las cortinas.

VIVIENDA CON MAYOR RESISTENCIA EN LAS PAREDES Y MAYOR AISLAMIENTO EN TECHO

Este estudio intenta proponer una conversión de una vivienda existente para acercarla lo más posible a una de cero emisiones. Por tanto, cambiar los materiales de las paredes y techo es realmente aparatoso. La solución alternativa es la instalación de paneles aislantes que reduzcan el coeficiente de convección exterior (**Ilustración 13: Paneles de aislamiento exterior.**), liberando una menor cantidad de calor. Tal efecto debe acercar, cuando se necesite calefacción, la temperatura de la pared exterior, la del tejado y la pared interior y el techo a la del interior de la vivienda. Al no estar en contacto con el viento, se puede asumir un coeficiente de convección exterior máximo igual al interior (al crear una cámara entre el panel y la fachada no hay convección forzada, lo cual da un valor de 7,5) cuando se trate de perder calor de la estancia. Por otro lado, cuando el tejado o la fachada se recalienten más de lo debido por la radiación, se puede seguir considerando un coeficiente de 25, puesto que se recalentará la parte exterior del panel primero, no la interior. En el caso de climas donde la refrigeración de la vivienda cobra más importancia, como es el caso del centro y sur de España, los paneles a instalar pueden ser de fachada ventilada, los cuales se refrigeran por convección en ambos lados del panel.



Ilustración 13: Paneles de aislamiento exterior.

El resultado de aislar con paneles exteriores la vivienda es el siguiente:

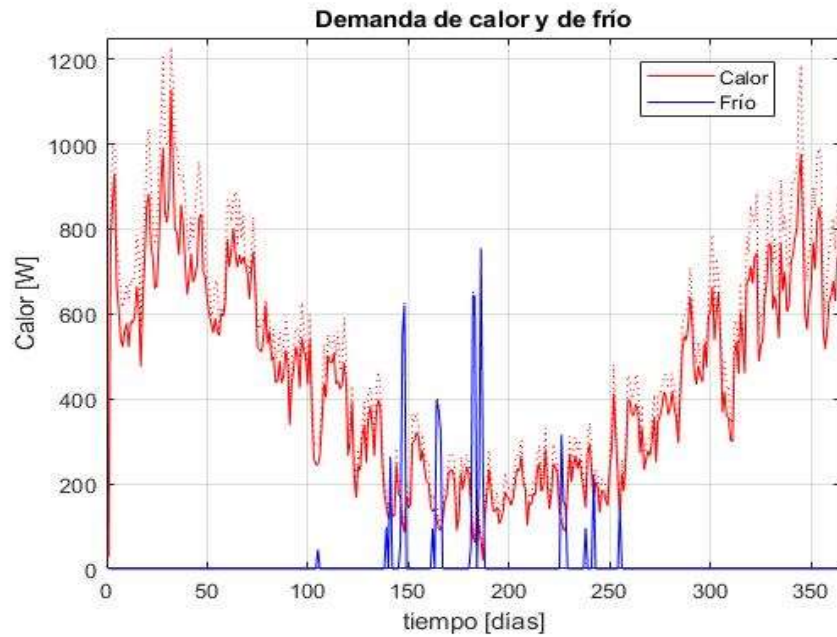


Figura 5: Demanda energética con paneles aislantes

Apréciase cómo baja la demanda térmica sin (línea de puntos) y con paneles aislantes (línea continua). La demanda térmica cae desde de los 4,37 a los 3,8MW·h, lo que es una caída significativa de alrededor de un 13%. Además, el ahorro energético se produce durante todo el año, aunque es más pronunciado en invierno, dadas las bajas temperaturas. Este hecho se puede apreciar en que el tejado y la pared exterior tienen un valor de temperatura más próximo a la temperatura del interior de la casa si se compara con la simulación del caso base (Figura 6).

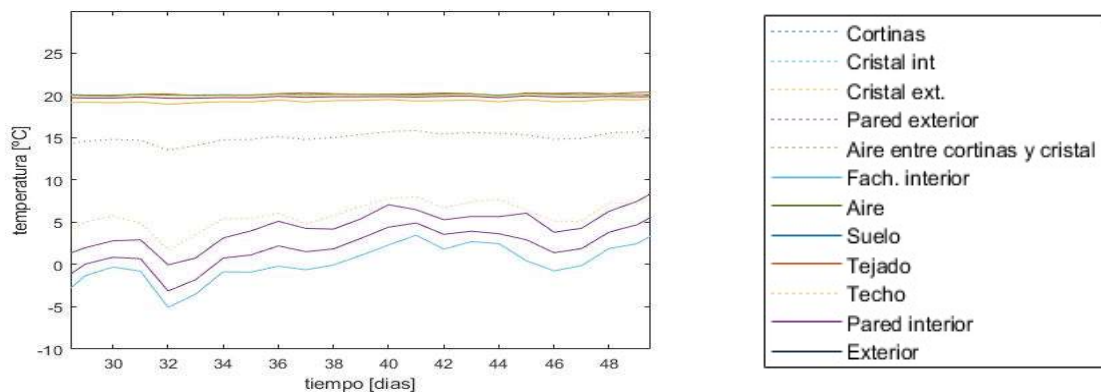


Figura 6: Temperaturas de un día de invierno sim. con paneles aislantes.

Por otro lado, se pueden considerar otras alternativas a cambiar los materiales de las paredes para incrementar su resistencia térmica, como es la **inyección de materiales aislantes en las cámaras de aire de las paredes**. En la simulación inicial se emplea un valor de $2,68 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, pero con inyección de poliuretano en una cámara de 100 mm se puede incrementar en $3,57 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, obteniendo un valor de $6,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, lo que se acerca a valores de viviendas energéticamente pasivas ($8\text{-}10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$). Si esta estrategia se suma a la instalación de paneles aislantes, la reducción de las necesidades térmicas llega hasta los $3,39 \text{ MW} \cdot \text{h}$, lo que implica una caída adicional de un 9% con respecto a la demanda inicial, resultando en un ahorro energético de

un 22% (Figura 7). En cuanto a la capacidad térmica (la demanda máxima instantánea o potencia nominal) se sitúa generalmente sobre los 1300W, aunque en determinados días llega hasta 1600W. Por último, esta reducción de energía no supone un ahorro enorme en términos monetarios (alrededor de 50 euros), pero si reduce la potencia nominal de cara a reemplazar las fuentes de calor por otras.

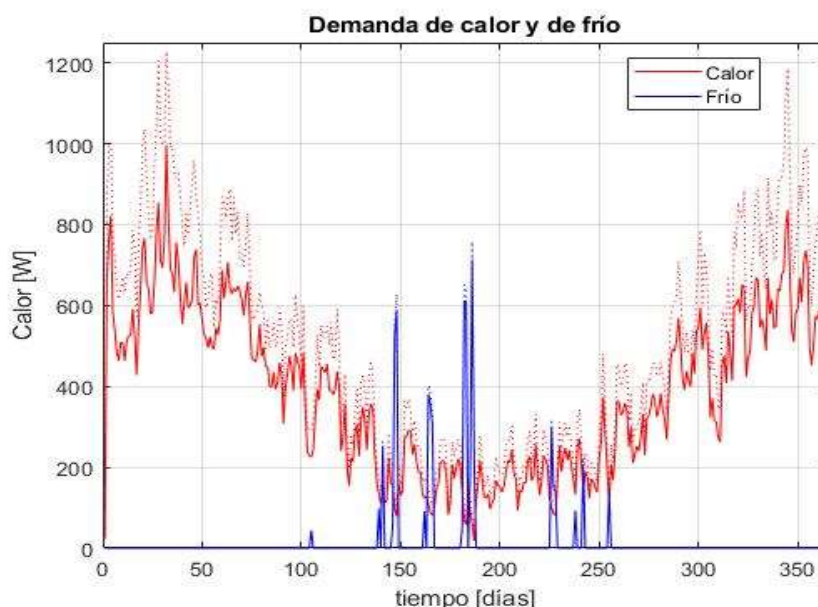


Figura 7: Demanda energética con paneles y poliuretano inyectado

VIVIENDA CON USO DE CORTINA PARA AISLAR

Las cortinas en las viviendas del norte de Europa tienen dos funciones en el acondicionamiento. Por un parte evitan que entren grandes cantidades de radiación solar y que la temperatura aumente demasiado; por otro, crean una pequeña cámara de aire entre el cristal interior y el exterior que reduce la convección y aumenta la resistencia equivalente del acristalamiento. En el primer caso, al no haber una necesidad de refrigeración grande, puesto que la temperatura exterior raramente supera los 29 o 30°C, evita que la vivienda se sobre caliente; si eso se une a una ligera relajación de las condiciones de confort (como por ejemplo aceptar una temperatura de 26 o 27°C puntualmente en ciertas horas del día), hace desaparecer la necesidad de refrigeración. En el caso de climas más cálidos, estas cortinas sí que serían efectivas, aunque en las zonas donde se necesita refrigeración, está generalizado el uso de persianas. En el primer caso, se darán alternativas de refrigeración libres de emisiones en los siguientes apartados. En el segundo caso, las cortinas sirven para proteger del frío en las horas más frías del día, cuando no hay luz natural. Sin embargo, la mejora no puede ser significativa, puesto que sigue existiendo una corriente entre el aire de la cortina y la estancia.

Debido a el previsible reducido impacto en el consumo energético del uso de cortinas, no se hacen simulaciones. Sin embargo, es de relevancia señalar distintos modelos de aislamiento en las ventanas, como el de España, donde existen persianas que se encuentran en el exterior de la venta y que bloquean muy efectivamente ambos el efecto del sol en las horas de máxima

radiación, disipando el calor por convección con el exterior, como el frío durante las noches. Las persianas evitan que exista una convección grande entre los cristales exteriores y el aire, reduciendo el coeficiente correspondiente y permitiendo que el calor se disipe en el ambiente a gran velocidad. El efecto de las persianas es el mismo que tienen los paneles aislantes mencionados en el apartado anterior, por lo que se les supone un efecto de ahorro similar en la calefacción, y son un elemento clave en el aislamiento en países del sur, pudiendo también serlo en los del norte contra el frío en periodos nocturnos.

IV – ALTERNATIVAS SOSTENIBLES DE ACONDICIONAMIENTO

Actualmente la inmensa mayoría de las viviendas utilizan gas para la calefacción. A pesar de que se han hecho grandes esfuerzos para disminuir el impacto ambiental y que el gas natural se plantea como una energía de transición, la realidad es que enormes cantidades de CO₂ se liberan a la atmósfera al utilizar gas como fuente primaria de energía. Si se quiere disponer de una vivienda con mínimo impacto ambiental existen únicamente 2 alternativas:

1. Convertir la vivienda en energéticamente pasiva. Este sistema es el ideal, ya que no se necesitan sistemas de acondicionamiento, si no que se juega con las inercias térmicas. Sin embargo, este sistema es muy complicado de conseguir y se emplea en nueva construcción, no en mejoras de casa existentes, puesto que: los materiales se deben sustituir por completo y son muy costosos, es necesario orientar la casa en función del clima, hay que tener en cuenta la enorme variabilidad del clima de un año a otro y asumir la falta de acondicionamiento en determinados periodos.
2. Disminuir la necesidad de energía al máximo y emplear sistemas de acondicionamiento que no empleen hidrocarburos como energía primaria. Es el ideal para la acercar el acondicionamiento de la vivienda a cero emisiones con un coste asumible, y en consecuencia el modelo que se puede aplicar de manera generalizada.

A continuación, se analizarán las diferentes alternativas. Se evaluarán 3 aspectos para determinar su idoneidad:

1. Capacidad térmica: ¿aporta o ahorra suficiente energía como para merecer la pena emplear esa tecnología? ¿Es suficiente, o es necesario combinarla con otras?
2. Coste: ¿existe un retorno de ahorro de energía que justifique su uso? ¿se necesita combinar la esa alternativa con otras que, combinadas, justifiquen el coste?
3. Posibilidad de instalación. ¿se puede instalar esa tecnología independientemente en cada vivienda, o debe ser de manera combinada con los vecinos? ¿Vale tanto para piso como para casas unifamiliares?

BOMBAS DE CALOR

Las bombas de calor emplean un ciclo de Rankine inverso en el que se aporta energía mecánica (obtenida con electricidad) y se obtiene una diferencia de temperatura entre el evaporador y el condensador. Permiten transportar la energía tanto de dentro hacia fuera como de fuera hacia dentro con altos niveles de eficiencia. Existen aparatos de alta eficiencia con COP mayores de 5, aunque aquí se supondrán valores de COP=4, que es la norma general entre los productos comerciales.

Este tipo de máquinas térmicas suelen tener la opción de refrigeración y calefacción, por lo que son idóneas para cubrir las necesidades de refrigeración que existen en pocas ocasiones durante el año, aunque supongamos la vivienda en un clima donde predominan las necesidades de calefacción. Además, permiten disponer de un sistema de calefacción más eficiente en comparación a los convencionales. No tiene mucho sentido calentar agua a 70-

80°C con una llama que alcanza los 800; sin embargo, las bombas de calor gastan la energía justa para elevar el agua o el aire hasta una temperatura deseada que suele rondar los 30-40°C.

A continuación, se lleva a cabo un pequeño estudio sobre la viabilidad económica de la adopción de una bomba de calor. Se hacen ciertas suposiciones:

- Se trata de averiguar si se amortiza la inversión únicamente sustituyendo la calefacción. Por ello, se supone que el coste del gas es eliminado y sustituido por la bomba de calor con gasto de electricidad.
- El precio de la luz se supone constante y es el propio de España (muy similar al de otros países de Europa en contra de la propaganda mediática). Esto no es realista, pero no se puede estimar si subirá o bajará, ya que depende de políticas energéticas, cambios de gobierno, precio de petróleo, etc. Además, el clima de Países Bajos con el que se han dimensionado las necesidades energéticas es parecido al del norte de España en cuanto a necesidades de calefacción, por lo que es extrapolable. En cuanto al tipo fijo de luz, se supone que no es necesario aumentar la potencia instalada en la vivienda.
- No se aprecia cambio de precio de gas. Esta estimación es con un alto nivel de incertidumbre, aunque lo más probable es que el precio del petróleo se va a ir incrementando en los próximos años, y con él, el gas en una proporción superior al precio de la luz. Este hecho solo proporcionaría más rentabilidad.
- La inflación se supone constante, ya que la incertidumbre del precio de la luz y el gas es suficientemente grande como para que no merezca la pena incluirla.
- Los precios de los equipos son orientativos de mercado para esa potencia. Precios exactos se darán más adelante para una propuesta de transformación más detallada.

Tabla 3: Estudio de amortización de bomba de calor

Precio de la instalación	3000 ¹ €
Potencia Nominal	3,5-4,5 KW
Precio Gas Variable	0,05371 €/KW·h
Precio Gas Tipo Fijo	51,36 €/año
Consumo Gas	3,39 MW·h/año
Precio de la Luz	0,116955 €/KW·h
COP	4 -
Amortización	17 Años

En estas circunstancias la amortización se alcanza en unos 17 años, casi la vida útil de la bomba de calor. Aunque asumible, es un periodo muy largo y sujeto a grandes incertidumbres en los precios de la luz y los combustibles. Debido a ello y al tener la bomba de calor potencia suficiente como para suplir al gas también en el agua caliente (3,5KW de potencia frente a los 1,6 necesarios para la calefacción), se incluye este coste en la operación. Según el IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía), el gasto de agua caliente a 60°C por persona es de 22 litros al día. En la vivienda se suponen 2 personas, por lo que serás 44 L.

¹ <https://tuclimatizaciononline.es/bomba-de-calor-aerotermica-mitsubishi-suhz-sw45va-ersd-vm2c.html>

Asumiendo que se calienta desde unos 10°C, el consumo energético anual para agua caliente es de 930KW·h.

Tabla 4: Estudio de amortización de bomba de calor incluyendo agua caliente

Precio de la instalación	3000	€
Potencia Nominal	3,5-4,5	KW
Precio Gas Variable	0,05371	€/KW·h
Precio Gas Tipo Fijo	51,36	€/año
Consumo Gas	4,32	MW·h/año
Precio de la Luz	0,116955	€/KW·h
COP	4	-
Amortización	15	Años

Con este cambio se consigue disminuir el periodo de amortización ligeramente. Sin embargo, el principal motivo por el que se incluiría el agua caliente al sistema de bomba de agua es el deshacerse del gas y eliminar la necesidad de quemar hidrocarburos en la vivienda, puesto que el periodo de amortización sigue siendo muy alto.

Finalmente, es necesario indicar que, en el caso de que hubiera más personas viviendo en la casa, el periodo de amortización se reduciría, por lo que ésta es una tecnología idónea para viviendas familiares o con varios inquilinos.

SUELO RADIANTE

El suelo radiante consiste en sustituir los emisores de calor del sistema de calefacción por el mismo suelo (véase la Ilustración 14). Para ello se transmite el calor de una forma u otra al suelo de la vivienda. El suelo es generalmente calentado mediante un sistema de tuberías por las que pasa agua a la temperatura deseada. Es un enfoque inteligente e ingenioso por varios motivos, que van desde el aprovechamiento de la energía y la estrategia de acondicionamiento hasta la eficiencia en su generación.

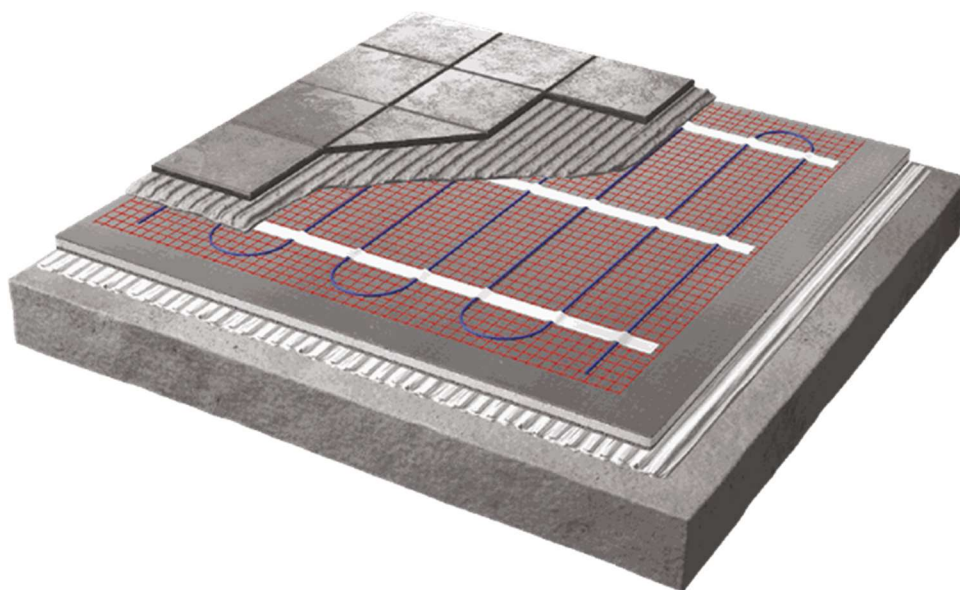


Ilustración 14: Suelo radiante.

En primer lugar, la forma de acondicionamiento es diferente a cualquier otro tipo de calefacción. Como está indicado, el confort se encuentra en un área que depende de la temperatura del ambiente y de la temperatura radiante media (Ilustración 5). Con la calefacción convencional se calienta el aire, que luego calienta el suelo, techo y paredes, resultando en una temperatura radiante media inferior al ambiente en condiciones de calefacción. Sin embargo, el suelo radiante eleva considerablemente la temperatura radiante media, haciendo necesaria una menor temperatura del aire, y por tanto reduciendo las pérdidas de calor. En las simulaciones que se llevan a cabo la temperatura mínima de confort es de 20°C. Debido a que no se debe bajar de ese valor para mantener los niveles de confort, no se ahorraría nada siguiendo esta estrategia de control. Sin embargo, en la estación invernal, cuando la temperatura radiante media baja, el suelo radiante la eleva y evita que las personas en la estancia deban llevar puesto algo más que una camiseta.

La segunda ventaja reside en que la temperatura a la que hay que calentar el agua no es alta, ya que una elevada temperatura del suelo resultaría en pérdida de confort. El agua tiene una temperatura de entre 30 y 45°C, frente a los 70-85°C de un sistema de calefacción por medio de radiadores. Esto hace que la eficiencia se incremente considerablemente si se emplean bombas de calor e incluso habilita su uso, ya que con estas es difícil alcanzar los 80°C (disminuye el rendimiento) de un sistema convencional.

En cuanto a la inercia térmica, ya se ha incluido el efecto en el modelo. A parte de almacenar el calor y distribuirlo uniformemente en la vivienda, permite disminuir la capacidad necesaria (la cantidad de potencia de la que necesita disponer el sistema), disminuyendo el coste de los aparatos.

El coste de instalación del suelo radiante es menor del que se puede imaginar. En nueva construcción el inconveniente es mínimo, pues el precio del suelo radiante es absorbido por el potencial precio de un suelo convencional. Por contrario, en una reforma de una vivienda el precio oscila² entre los 40 y los 80 €/m². Si se supone un precio medio de 50 €/m² el precio total sería de 2150 € para esta vivienda en particular.

Para concluir, es necesario decir que la adopción o no de esta estrategia de acondicionamiento depende del presupuesto disponible y del sistema de calefacción. Si es el caso que se emplea una bomba de calor, se pueden crear sinergias por la potencial reducción de la capacidad de la bomba y por el aprovechamiento del agua caliente por debajo de 40°C. Aunque en este caso no se ahorre energía, el hecho de emplear suelo radiante puede ser una buena alternativa para deshacerse del gas, emplear calefacción de baja temperatura y aumentar el confort.

² <https://www.houzz.es/ideabooks/65150541/list/climatizacion-radiante-como-cuando-y-cuanto-cuesta-instalarla>

PLACAS SOLARES Y AEROGENERADORES

Es evidente que los aerogeneradores y las placas solares no son recursos que disminuyan el consumo de energía, pero si sustituyen parte de ésta. El objetivo al usar este tipo de tecnología es sustituir la energía primaria de combustibles fósiles a luz del sol y viento para producir electricidad. Debido a esto, este tipo de recursos, empleados con fines de acondicionamiento, deben ir acompañados de otras tecnologías como las bombas de calor que puedan emplear esa energía eficientemente.



Ilustración 15: Vivienda con placas solares y aerogeneradores para el autoconsumo.

Hasta hace relativamente poco, el precio de este tipo de aparatos era enormemente caro. Sin embargo, el creciente interés por ellos, la producción en masa y los avances técnicos han posibilitado que el precio baje considerablemente hasta el punto de hacer posible la amortización de su coste en relativamente pocos años. Además, el uso de la electricidad en la vivienda hace que el sobredimensionamiento del sistema para la calefacción no sea un problema, ya que esa energía será aprovechada por el resto de los electrodomésticos y la inversión seguirá siendo aprovechada.

Para determinar si es conveniente o no la adopción de esta tecnología, se debe determinar la capacidad necesaria. En este tipo de sistemas, el almacenamiento es crítico, ya que la generación de energía es intermitente. Por ello, se deben tener en cuenta dos parámetros: la potencia que se puede generar y la potencia que puede dar el banco de baterías. La primera debe ser suficiente para mantener cargadas las baterías, por lo que dependerá del clima y la estación del año. La segunda debe ser suficiente como para aportar la potencia instantánea necesaria en todo momento, es decir, 1600W, aunque serían 1300 (véase el apartado

Vivienda con mayor resistencia en las paredes y mayor aislamiento en techo) si se relajan los objetivos de confort en días muy puntuales al año. Debido a la intermitencia de las fuentes

renovables, para asegurar un suministro mínimo todos los días que permita operar con baterías (sobre todo si la vivienda no se encuentra en el centro-sur de España), se deben escoger dos fuentes de energía, las cuales son fotovoltaica y eólica. Con una combinación de ambos sistemas de generación, los cuales se solapan de forma altamente efectiva, se puede asegurar un suministro de energía diario. A su vez, las baterías almacenan la energía en exceso en aquellos momentos de mayor generación para su posterior consumo. Los costes aquí considerados son reales y orientativos del mercado (véase el Anexo para más información).

Para el análisis de viabilidad se hacen las mismas suposiciones que en el apartado anterior incluyendo el coste de la bomba de calor.

Tabla 5: Estudio de amortización del sistema de generación renovable con la bomba de calor

Precio de la instalación	3000 ³ €
Potencia Nominal	1000 (3000 de pico) W
Precio Gas Variable	0,05371 €/KW·h
Precio Gas Tipo Fijo	51,36 €/año
Consumo Gas	4,32 MW·h/año
Amortización	19 Años

Habiendo visto previamente que la sustitución del gas por la bomba de calor provocaba que la amortización fuera de 19 años, si añadimos el coste del sistema de generación sin explotarlo al máximo, la rentabilidad de la inversión disminuye y sitúa el periodo de amortización en 19 años. Para poder disminuir ese tiempo se deberá incluir en el cálculo el ahorro de electricidad que se tiene, además del de calefacción y agua caliente.

Para ahorrar, dado que la vivienda dispone de un sistema de generación renovable que excede las necesidades de acondicionamiento, y que únicamente viven 2 personas, se disminuirá la potencia contratada de 3,5KW a 1,1KW (un ahorro anual de 120 euros). Además, la bomba de calor se empleará para el suministro del agua caliente sanitaria, la cual supone 932KWh al año para una vivienda de 2 personas. El kit de generación solar es de 1000W (3000 de pico), al igual que el eólico, y las necesidades de calefacción no exceden en ningún momento los 1600, por lo que se podría suponer que parte de lo generado sirve para sustituir el consumo de red. Suponiendo que el aerogenerador funciona un 50% a potencia nominal (1000W con 8m/s de viento), puede generar anualmente 4,38MWh anuales; en cuanto al kit solar, genera según el fabricante 1,97MWh anualmente. Con esas generaciones, el excedente de energía es de alrededor de 2MWh, la cual sustituye al consumo eléctrico regular de la red. Siendo el consumo eléctrico medio de una vivienda de 2 personas en España de 2100KWh⁴, el ahorro sería casi total si no llega a ser por los picos de demanda en la vivienda. Asumiendo que se sustituye el 85% de la energía consumida, se toman de la red 315KW·h al año con una potencia contratada inferior, lo que supone un ahorro de unos 400€ al año, según la web de la CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia⁵).

³ <https://autosolar.es/kit-solar-aislada/kit-solar-instalacion-aislada-3000w-24v-5400whdia>

⁴ <http://www.comparatarifasenergia.es/comparar-precios-de-energia/consumo-medio>

⁵ <https://facturaluz2.cnmc.es/>

Tabla 6: Estudio de amortización del sistema de generación renovable con la bomba de calor y la reducción de gasto en electricidad

Precio de la instalación	3000	€
Potencia Nominal	1000 (2000 de pico)	W
Precio Gas Variable	0,05371	€/KW·h
Precio Gas Tipo Fijo	51,36	€/año
Consumo Gas (calefacción + agua)	4,32	MW·h/año
Ahorro en luz	400	€/año
Amortización	9	Años

El tiempo de amortización se reduce considerablemente hasta 9 años, lo que es un valor más que aceptable, teniendo en cuenta que la vida útil de las baterías es de 12 años y que el resto de los componentes dispondrían de otros 10 años. Por tanto, la adopción de estas tecnologías es ecológicamente beneficiosa y económicamente viable.

MOTORES DE COGENERACIÓN

Cuando el mix energético tiene un alto porcentaje de combustibles fósiles para generar electricidad, una alternativa es generarla de manera autónoma. Los motores de cogeneración permiten aprovechar el calor residual de los motores de combustión interna (con eficiencias de entre el 25 y el 35%) para calentar agua, que puede ser utilizada tanto para calefacción como para consumo. De esta manera, se sustituye la quema de gas para calentar agua por el aprovechamiento residual del calor del motor. Dependiendo del porcentaje de combustibles fósiles en el mix energético (carbón y gas), esta tecnología reduce las emisiones totales. A parte de los motores de combustión interna, también existen motores de cogeneración con otras tecnologías, como el motor Stirling, de microturbina y con pila de combustible.

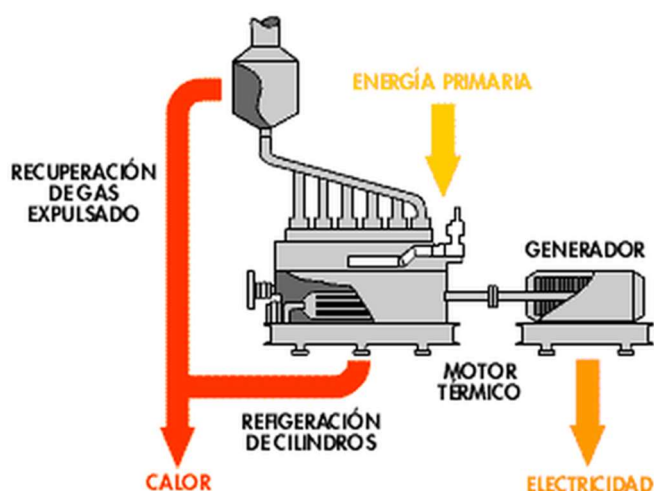


Ilustración 16: Motor de cogeneración

La gran desventaja de estos motores es que, aunque tienen una gran eficiencia, se siguen empleando combustibles contaminantes. Además, suelen tener potencias nominales más altas de las necesarias para una vivienda de tamaño medio, por lo que no se puede aprovechar al máximo la instalación (véase apartado en el Anexo **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por este motivo, y por la falta de espacio en la vivienda, no es adecuado para la propuesta de transformación del modelo de acondicionamiento. Por contrario, para las viviendas unifamiliares grandes, donde se dispone de espacio y se tiene mayor demanda, este tipo de motores pueden constituir una buena alternativa.

BUFFERS DE CALOR:

Los buffers o acumuladores de calor permiten almacenar energía obtenida mediante cualquier proceso. Proporcionan una gran inercia al sistema, lo que es crítico para la capacidad de reacción cuando existe una gran demanda térmica; este hecho permite que los aparatos necesiten una menor potencia nominal y de pico, abaratando considerablemente la inversión inicial.

Los buffers consisten generalmente en un depósito aislado de agua, la cual es calentada de diversas maneras. La sencillez del sistema y el bajo mantenimiento hacen de los buffers de calor una muy buena opción para abaratar la inversión inicial.



Ilustración 17: Buffer/Acumulador de calor.

Medir qué cantidad de energía pueden ahorrar es difícil, pero se puede suponer que la bomba de calor empleada en los apartados anteriores puede sustituirse por una de menor capacidad térmica, y por tanto de menor coste. Se pueden encontrar acumuladores de calor por unos 150 o 200€⁶ para una vivienda de este tamaño, lo que hace que merezca la pena reducir la potencia de la bomba, que es un aparato mucho más caro. Por otro lado, no se encuentran bombas de calor de menor potencia que la anteriormente indicada, por lo que el ahorro no

⁶ <https://www.gasfriocalor.com/deposito-de-inercia-ibaiondo-50-ar-a>

se materializaría. A pesar de ello, es de gran utilidad tener un buffer de calor para dar inercia y respaldo al sistema, por lo que por el coste moderado que supone, es un elemento necesario para cualquier vivienda.

COLECTORES SOLARES

Proporcionan una forma eficiente de calentar un fluido. Captan la radiación solar y evitan que ese calor se disipe por medio de la convección. Comparado con los paneles fotovoltaicos, los cuales transforman en energía eléctrica en torno al 15-17% de la radiación que reciben, los colectores aprovechan la gran mayoría de la radiación solar. En el caso en que se esté calentando agua por medio de una resistencia o una bomba de calor, una alternativa mucho más eficiente es hacerlo por medio de colectores solares.



Ilustración 18: Panel solar térmico

Por otra parte, los colectores solares pueden ser empleados para precalentar agua que después será utilizada bien por una caldera de gas o por una bomba de calor. Así, el consumo de electricidad o gas será menor, pues tendrán que elevar la temperatura menos grados.

La gran desventaja, al igual que la energía fotovoltaica, es la intermitencia y la dependencia de las estaciones. Por ello, este tipo de tecnología suele venir acompañada de buffers de calor. De esta manera se almacena toda la energía posible en el tiempo en que se puede disponer de radiación solar. Para llevar a cabo un breve análisis de la conveniencia de instalar colectores solares, se supondrá que se dispone de un buffer de calor, y que por tanto se puede almacenar toda la energía que se obtiene.

Los colectores solares son aparatos estáticos de bajo mantenimiento y relativamente poco coste (para una vivienda de 2 personas puede rondar los 1000€)⁷. Se puede hacer un sencillo cálculo de cuántos MW·h se ahorran al año en un caso óptimo. Tomando como ejemplo el calentador solar de la anterior referencia y orientación sur en el clima de Holanda, en

⁷ <https://nosolocasa.com/calentador-solar/1330-sistema-compacto-por-termosif%C3%B3n-vaillant-aurostep-pro2-150l.html>

condiciones óptimas sin ninguna pérdida en el acumulador se obtendrían 356 KW, lo que supondría un ahorro de menos de 20€ al año en Países Bajos (el precio del gas es similar al de España). Por tanto, no merecería la pena la instalación de un aparato así, ya que se basa únicamente en energía solar. Por otra parte, si la vivienda estuviera en el sur de España, donde los niveles de radiación son mucho mayores, el ahorro se convierte en significativo.

Para concluir, dada la naturaleza del clima, no existe una gran cantidad de radiación solar fuera del verano como para generar agua lo suficientemente caliente, por lo que la reducción en potencia nominal de la hipotética bomba de calor/caldera instalada no es posible, ya que en invierno se necesita mayor potencia. Por ello, en la vivienda en cuestión no es aconsejable la instalación de un colector solar para calentar agua.

ENERGÍA GEOTÉRMICA

Se trata de aprovechar el calor natural del interior de la tierra que se conduce por los cuerpos de roca caliente. Se trata de una fuente de energía renovable y no muy extendida, ya que requiere de una gran inversión. Esta energía se puede aprovechar bien para calefacción o para generación de energía. Ejemplos de ambos aprovechamientos se pueden encontrar por todo el mundo, como es el caso de Reykjavik, capital de Islandia, la cual se calienta enteramente mediante energía geotérmica; o el Complejo Geotérmico The Geysers, en EEUU, de 1,808 MW.

La cantidad de energía que se puede obtener es enorme y la inversión necesaria es desproporcionada si no se hace para ciudades enteras. En consecuencia, no aplicaría a la transformación del acondicionamiento de una vivienda, aunque si es un concepto interesante para proyectos a mayor escala, como es el citado caso de Reykjavik.

INTERCAMBIADOR DE CALOR CON EL SUBSUELO + BOMBA DE CALOR:

En los casos en que se emplea una bomba de calor para calentar el ambiente de la vivienda, el rendimiento y el consumo eléctrico de ésta varía sensiblemente según la temperatura de los dos focos. El primero es la propia vivienda, generalmente constante, mientras que el segundo suele ser el aire exterior. En ambientes en los que la temperatura exterior varía mucho, la calefacción y la refrigeración pueden disparar el consumo si se tiene que extraer calor de ambientes muy fríos o extraerlo a ambientes muy calientes. En esos casos, tiene sentido colocar el intercambiador de calor exterior en el subsuelo, el cual tiene una gran capacidad e inercia térmica que mantiene la temperatura más moderada comparada con el exterior y, en consecuencia, aumenta el rendimiento de la bomba. Para ello se debe instalar un intercambiador de calor que permita disipar toda la energía en el suelo, lo cual es altamente costoso.

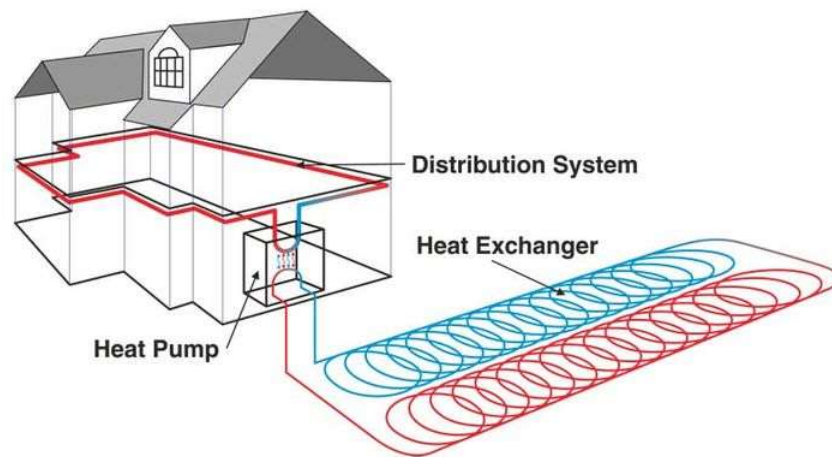


Ilustración 19: Intercambiador de calor con el suelo.

A pesar de que es un enfoque muy ingenioso y efectivo para aumentar la eficiencia de las máquinas térmicas, no sería aplicable a la vivienda que se ha propuesto en este estudio. En primer lugar, se debe disponer de espacio suficiente como para instalar el intercambiador de calor, como un jardín. En segundo lugar, la vivienda es un piso, lo que descarta el acceso al suelo y a su usufructo.

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN ACUÍFEROS:

Se trata de un concepto que engloba tanto buffers de calor como los intercambiadores de calor con el subsuelo. Esta técnica trata de aprovechar la gran inercia térmica de los acuíferos y su baja dispersión de la energía para aumentar el rendimiento de las máquinas térmicas (bombas de calor y ACS). Durante el invierno, se enfría el agua para calentar la vivienda, mientras que durante el verano ocurren lo contrario.

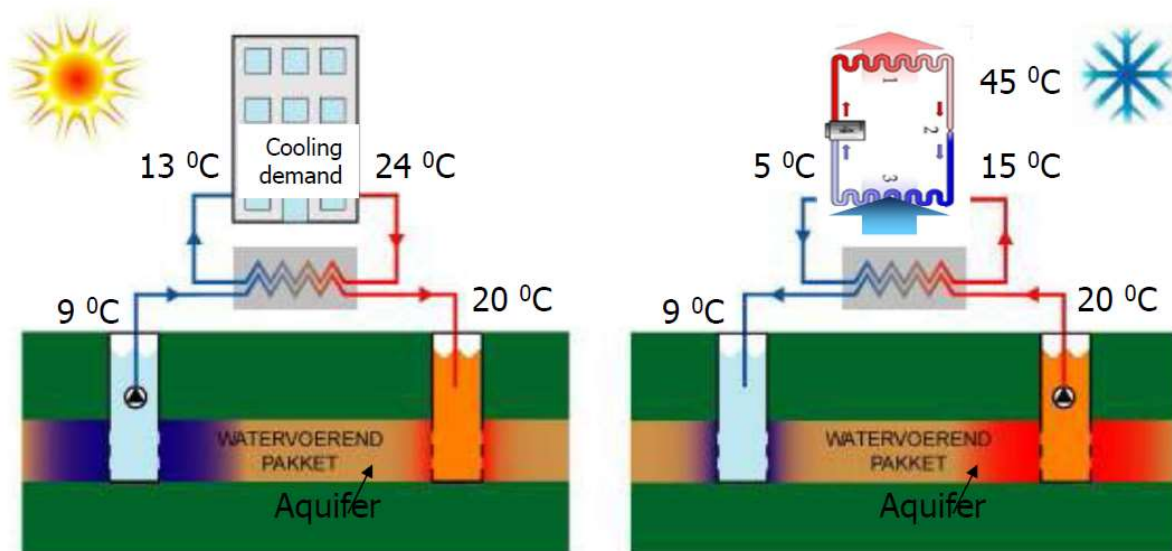


Ilustración 20: Almacenamiento de calor en acuíferos

A pesar de ser una gran idea para almacenar grandes cantidades de calor que de lo contrario serían disipadas, esta tecnología no es apta para utilizarse únicamente en viviendas. En primer

lugar, se necesitan instalar bombas de agua en distintos lugares del acuífero, También se necesita una cierta distancia entre dichas tomas para que el agua caliente y la fría no se mezclen. Además, esta alternativa se toma cuando la cantidad de calor que se necesita almacenar es tan enorme que no puede hacerse en un buffer de calor. En la vivienda en cuestión, las cantidades de calor no son tan colosales como para merecer la pena una instalación de este sistema, y se podría sustituir, en todo caso, por buffers de calor.

BIOMASA:

La calefacción por biomasa en viviendas se basa en la quema de madera o los llamados “pellets” para generar calor. Puede consistir en una simple chimenea o en una caldera de biomasa que sustituye el combustible convencional (gas o gasoil) por el ecológicamente sostenible. Es una alternativa que requiere un mayor mantenimiento que las calderas de gas, puesto que requiere de cargas de combustible no convencional. También se debe disponer de sitio para el almacenaje del combustible, por lo que un piso de menos de 50m² puede no ser el sitio ideal.



Ilustración 21: Caldera de biomasa a base de pellets o leña

Se pueden encontrar calderas de este tipo por unos 2500€⁸ capaces de calentar una vivienda de hasta 250m². Aplicado a la vivienda en cuestión es algo demasiado excesivo, y si se instalara sería como sistema de calefacción único, no de apoyo.

⁸ <http://grupobiosan.com/calderas-de-biomasa/calderas-de-biomasa-polcombustible/calderas-de-biomasa-polcombustible-gama-domestica-20-35/caldera-de-biomasa-polcombustible-gg25k-eco.html>

BIODIGESTORES

Los biodigestores permiten generar biogás a partir de los desechos generados en la vivienda. Es una manera muy inteligente de aprovechar los desechos orgánicos para disponer de una fuente de energía de combustión manteniendo la vivienda con un modelo de emisiones neutras. Se pueden encontrar por menos de 700€⁹, y la cantidad de biogás depende de cuánto se “alimente” el biodigestor. Sin embargo, es necesario disponer de cierto espacio en el exterior de la vivienda para poder colocarlos. En la vivienda que atañe a este estudio, se podría colocar en la terraza. Sin embargo, es poco probable que nadie quisiera perder metros en una vivienda pequeña para colocar un biodigestor como este, por lo que se debe descartar esta alternativa.



Ilustración 22: Digestor de biogás

⁹ <https://homebiogas.com/shop/buy-the-homebiogas-system/>

CAPÍTULO V – PROPUESTA DE CONVERSIÓN

Una vez se han revisado las diferentes tecnologías y evaluado su incorporación a la transformación del modelo de acondicionamiento, se deben escoger aquellas que acerquen más la vivienda al objetivo de cero emisiones. A pesar de que son válidas para diferentes situaciones, no todas lo son para una iniciativa individual en una vivienda de estas características. Véase en la siguiente tabla un resumen de las diferentes tecnologías:

Tabla 7: Tecnologías para la reducción de emisiones

Tecnología	¿Adecuada para este caso?	Efecto
Paneles exteriores aislantes	✓	Reducción 13% en consumo
Inyección de aislante en pared	✓	Reducción 9% en consumo
Cortinas	✓	Potencial ahorro en refrigeración
Persianas	✓	Similar a Paneles aislantes
Bombas de calor	✓	Sustitución de combustible primario
Suelo radiante	✓	Potencial ahorro en consumo
Micro generación renovable	✓	Capacita la sustitución del gas por energía libre de emisiones
Motor de cogeneración	✗	-
Acumuladores de calor	✓	Reduce la potencia nominal necesaria.
Colectores solares	En localizaciones del sur ✓	Aporta agua caliente.
Energía geotérmica	✗	-
Intercambiador de calor con el suelo	✗	-
Almacenamiento de energía en Acuíferos	✗	-
Biomasa	✓	Sustitución de combustible primario

Por supuesto, no se pueden adoptar todas las tecnologías, hay que escoger las más convenientes. Para ello se debe tener en cuenta el coste, la idoneidad para la vivienda estudiada y la reducción que se hace de CO₂. Estas tres variables se pueden ponderar como se desee, dando más prioridad al coste o a las emisiones. En general se puede apreciar cómo unos límites inamovibles de emisiones o coste pueden ser verdaderamente perjudiciales para la otra variable, por lo que se persigue un buen equilibrio.

En primer lugar, se analiza con qué combinaciones de las anteriores alternativas se puede llevar a cabo la transformación de la vivienda hacia el objetivo de cero emisiones. No aparecen todas, pero sí las que tienen más lógica según el análisis de apartados anteriores. Las combinaciones siguientes no son las únicas posibles, pero son paquetes de tecnologías que tiene sentido emplear conjuntamente.

Tabla 8: Combinaciones de tecnologías a aplicar

Tecnología	1.Mínimo	2.Adecuado para calefacción	3.Conversión energética completa de la vivienda (I)	4. Conversión energética completa de la vivienda (II)
Paneles exteriores aislantes	✗	✓	✓	✗
Inyección de aislante en pared	✗	✓	✓	✗
Bombas de calor	✓	✓	✓	✓
Suelo radiante	✗	✗	✗	✗
Micro generación renovable	✗	✗	✓	✓
Acumuladores de calor	✓	✓	✓	✓
Biomasa	✗	✗	✗	✗

La primera combinación propone instalar una bomba de calor en la vivienda para sustituir por electricidad al gas como fuente primaria de energía. Dependiendo de la potencia nominal de la vivienda, se puede también sustituir al gas para aportar agua caliente sanitaria. Teniendo en cuenta las potencias nominales mínimas de las bombas de calor y que la vivienda no es de gran tamaño, este objetivo es plausible. La gran ventaja de esta opción es la inmediatez de la conversión y el coste, el cual es minimizado al no tener que hacer otras inversiones. Por contrario, no se reduce el consumo energético de la vivienda, si no que se sustituye la energía primaria para acondicionarla, lo cual puede ser efectivo dependiendo del mix energético del suministro eléctrico. Hoy en día, debido a que más del 60% de la energía en Países Bajos y alrededor del 40% en España se produce a partir de combustibles fósiles, no es algo que evite las emisiones al acondicionar la vivienda. Tampoco se atisba una gran reducción en esos porcentajes a un corto o medio plazo, ya que las instalaciones deben ser amortizadas y seguirán funcionando.

La segunda alternativa reduce las pérdidas mediante aislamiento extra en el techo y paredes, y sustituye la energía primaria por medio de la bomba de calor. Esta alternativa reduce la demanda energética y las emisiones, pero sigue faltando de una energía primaria libre de emisiones, como la primera opción.

En cuanto a la tercera combinación, ésta incluye varias tecnologías que aseguran que la energía empleada en la vivienda es de procedencia libre de carbono. Se sigue confiando en la red para el consumo eléctrico en cierta proporción, pero en una cantidad mucho menor que en principio. Además, tanto el agua sanitaria como el acondicionamiento se pueden llevar a cabo mediante energía 100% renovable. Por otro lado, el coste es mucho mayor, al incluir varias reformas en la casa que pueden ser costosas en comparación con el ahorro que se produce.

Finalmente, la cuarta combinación no reduce el gasto energético, pero garantiza que la energía empleada para el acondicionamiento es casi en su totalidad libre de emisiones. Además,

permite surtir de electricidad parte del consumo doméstico, por lo que las emisiones por esa parte también se reducen.

Véase en la siguiente tabla el coste de las transformaciones del sistema de aislamiento acondicionado para la vivienda. Estos costes, aunque orientativos, puesto que podrían variar de un aparato y servicio a otro, son de mercado, por lo que se pueden considerar una buena aproximación. Los cálculos del ahorro de electricidad y del gas se han llevado a cabo como en apartados anteriores.

Tabla 9: Coste de las diferentes alternativas.

Tecnología	Coste unitario	1.	2.	3.	4.
Paneles exteriores aislantes	56€/m ²	✗	✓	✓	✗
Inyección de aislante en pared	600€/vivienda	✗	✓	✓	✗
Bombas de calor	2.969,99€	✓	✓	✓	✓
Suelo radiante	50€/m ²	✗	✗	✗	✗
Micro generación renovable	2.985€	✗	✗	✓	✓
Acumuladores de calor	155€	✓	✓	✓	✓
Biomasa	2.599€	✗	✗	✗	✗
Coste total para la vivienda		3.124,99€	4.984,99€	7.969,99€	6.109,99€
Amortización (aproximada)		17,25 años	24 años	11,5 años	10,5 años

Véase que los años en los que se amortiza una transformación así no justifican la inversión si se emplea un criterio conservador. La transformación más completa, la número 3, se tardan 11 años y medio en amortizarla. Siguiendo un criterio conservador, sería complicado dar el visto bueno a la inversión, ya que los precios de las energías están sujetos a significativas fluctuaciones al medio y largo plazo. Por ello, en la decisión se debe ponderar también el factor ecológico, el cual ayuda a inclinar la balanza.

Por otro lado, existen ayudas de fondos europeos a través del IDAE para llevar a cabo transformaciones en las viviendas, como la instalación de paneles solares e inyección de aislante en las paredes. Estas ayudas, aunque han reducido significativamente su cantidad en los últimos años, pueden ser cruciales para animar a los propietarios a llevar a cabo estas transformaciones.

Como propuesta de conversión, se escoge la número 3. Debido al elevado precio de la electricidad, es clave para obtener un periodo de amortización asumible que se disponga de generación de electricidad suficiente como para cubrir no solo la calefacción, sino además el agua caliente sanitaria y parte de la electricidad. Los kits de generación renovable no están dimensionados para que se pueda tener un periodo de amortización razonable si se suma su coste con el de otras modificaciones (bomba de calor, etc). Además, dados los mix energéticos actuales, acondicionar una vivienda con cero emisiones no se puede hacer mediante energía de la red eléctrica, ya que una parte muy considerable ha sido generada a partir de combustibles fósiles, por lo que las opciones 1 y 2 deberían ser descartadas.

CAPÍTULO VI – RECOMENDACIONES Y CONCLUSIÓN

Una vez analizados los resultados, comentadas las diferentes alternativas y propuesta una de ellas, este estudio pretende: aportar ciertas recomendaciones para avanzar en diferentes grados hacia la vivienda sostenible de cero emisiones/emisiones neutras; realizar una crítica sobre la metodología y hacer una propuesta de mejora; y enunciar alguna conclusión.

Recomendaciones

De cara a la reconversión energética de las viviendas, se deben tener en cuenta una serie de recomendaciones:

- Como se ha dicho en un principio, el principal paso es acabar con las infiltraciones de las viviendas mediante el sellado de las juntas.
- Es imprescindible para viviendas de más de 25 años llevar a cabo reformas para disminuir el gasto energético, como inyección de aislantes en las fachadas e instalación de paneles aislantes. Estas reformas ayudan a reducir considerablemente su consumo, puesto que los materiales no eran de la misma calidad aislante que en la actualidad.
- Para asegurar cero emisiones, es necesario disponer de kits de generación renovable. Esto ayudará también a disminuir el periodo de amortización.
- Se deben solicitar ayudas públicas para ayudar a la viabilidad de los proyectos. Existen planes de financiación de instituciones públicas en toda Europa (IDAE por ejemplo) para promover las reformas en viviendas particulares que aumenten la eficiencia económica. A pesar de que una de las motivaciones de este trabajo era demostrar que se pueden llevar a cabo este tipo de proyectos, lo cierto es que las ayudas públicas pueden jugar un papel clave.
- Se deben relajar los objetivos de acondicionamiento y sustituirlos por tipos de vestimenta.
- Aunque no se han discutido en este trabajo, se debería educar en hábitos de consumo energético, ya que un inteligente uso de los recursos puede ahorrar grandes cantidades de energía.
- La colaboración en comunidades puede abrir la puerta a emplear tecnologías innovadoras que requieren un esfuerzo conjunto y no pueden ser empleados por un particular individualmente.

Crítica

La metodología seguida en la simulación permite identificar dónde se pierde más calor en la vivienda. Sin embargo, se puede hacer una reflexión sobre si sería más adecuado llevar a cabo otro tipo de simulaciones. Durante la elaboración del código, se reflexionó extensamente sobre los flujos de calor de los diferentes componentes de la vivienda. En futuros proyectos, si se quieren identificar las causas de pérdida de calor más detalladamente, sería más adecuado simular componentes de la vivienda individualmente (ventana, pared, techo, suelo). Sin embargo, este método da una visión global de los flujos de calor también entre diferentes

elementos de la vivienda, lo cual otros métodos no. Además, permite dimensionar el equipo que se propone instalar en la vivienda.

Por otro lado, se podría haber hecho una simulación con el software Simulink, pero al ser los intervalos de tiempo tan largos (1 hora), y al haber linealizado las ecuaciones, no se pierde precisión en los cálculos y se mantiene un gran control de la ejecución del código.

Conclusión

En este trabajo se han identificado las carencias del acondicionamiento de una vivienda estándar, se han sugerido reformas y mejoras, estudiado las alternativas que existen a los actuales sistemas de acondicionamiento y propuesto una serie de reformas para una vivienda en concreto.

El principal motivo de la pérdida de calor en las viviendas es la capacidad aislante de sus materiales. Con reformas no muy invasivas ni costosas se puede incrementar la eficiencia del sistema. Existen varias tecnologías que combinadas pueden sustituir no solo al sistema de calefacción y agua caliente, sino también aportar refrigeración y sustituir en gran medida al sistema de suministro eléctrico. Por último, para un piso con posibilidad de instalar un sistema de energía renovable, se puede lograr el objetivo de transformarla en una vivienda con cero emisiones con una inversión que ronda los 12.000€.

Como conclusión, se puede afirmar que la transformación del modelo de acondicionamiento de una vivienda estándar es relativamente asequible económicamente. Es una inversión recuperable y que beneficia a todos. Sin embargo, no se puede decir que se pueda llevar a cabo una transformación hasta un modelo de cero emisiones en todas las viviendas. Para lograr una transformación así, es necesario bien disponer de un sistema de generación de energía renovable o que el mix energético cambie radicalmente.

BIBLIOGRAFÍA

- Chapman, A. (1984). Heat Transfer. *Mac Millan publishing Company*.
- D.G, S., & G.P, M. (1973). Cooling load calculation by thermal response factors. *ASHVE Transactions* 73(1028).
- deBilt. (1964-1965). Climate dataset The Netherlands.
- Fanger, P. (1970). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- Fanger, P. O., Ipsen, B. M., Langkilde, G., Olesen, B. W., Christensen, N. K., & Tanabe, S. (1985). Comfort limits for asymmetric thermal radiation. *Energy and buildings*, 8(3), 225-226.
- Gunerhan, H., & Hepbasli, A. (2007). Exergetic modeling and performance evaluation of solar water heating systems for building applications. *Energy and Buildings*(39(5)), 509-516.
- Hardy, J.D., Gagge, A.P. Stolwijk, J.A. (1970). Physiological and behavioral temperature regulation. *Charles C. Thomas*.
- Höglung, B., Mitalas, G., & Stephenson, D. (1966). Surface Temperatures and Heat Fluxes for Flat Roofs. *Building Science*, 2(301), 29-36.
- IDAE. (2011). *Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-20120*. Madrid.
- Kusuda, T. (1969). Thermal response factors for multilayer sructues of various heat conduction systems. *ASHARE Transactions*(2108).
- Olesen, B. e. (n.d.). *Vertical air temperatur differences and comfort in Indoor Climate*. Danish Building Research Institute, Copenhagen.
- Ozgener, L., Hepbasli, A., & Dincer, I. (2005). Energy and exergy analysis of geothermal district heating systems: an application. *Building and Environment*(40(10)), 1309-1322.
- Ozgener, O., & Hepbasli, A. (2005). Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. *Energy and Buildings*(37(1)), 101-110.
- P.J.Lute. (1992). *The use of predictions in temperaure conrol in buildings*. Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Paassen, A. v. (1981). *Indoor Climate, Outdoor Climate and Energy Consumption.A new approach to the calculation of the effect of the outdoor and indoor climate on the energy consumption in buildings based on methods of statistical analysis*. Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Stephenson, D., & Militas, G. (1967). Cooling load calculation by thermal response factors. *ASHVE Transactions* 73 ((1028)).

ANEXO

CÓDIGO

SCRIPT DE PARÁMETROS

```
%% SCRIPT DE PARÁMETROS
%clear all
clf
close all
clc

%% =====
%                               Parámetros
% =====

%Comunes
Temp = 22 * ones(12,1); %Vector columna de las temperaturas a 22 grados
coef_abs = [0.16 0.13 % con blinds
            0.13 0.1]; %sin blinds %Parámetros de absorción
global alfa_rad; alfa_rad=4.8; % Coeficiente de transferencia de calor.
Calculated with Uvalue
global alfa_conv_ext; alfa_conv_ext = 25; % [W/m^2·K] Coeficiente de
convección exterior f
global alfa_conv_int; alfa_conv_int = 7.5; % [W/m^2·K] Coeficiente de
convección interior
global M_flujo_ventana; M_flujo_ventana =
1*3600*0.1*1.8*1.2; % [m/s]*[seg/h]*[m^2]*[Kg/m^3] %Coeficiente flujo aire
entre ventana y cortina
global alfa_abs_calor; alfa_abs_calor = 0.29; %Coeficiente de absorción de
calor en
superficies

global Rp; Rp = 2.68; %6.25; %Resistencia de la pared
global M_aire; M_aire= 50; %
0.05*3600*0.1*1.8*1.2; % [m/s]*[seg/h]*[m^2]*[Kg/m^3]
global C_p; C_p = 1; %calor específico del aire
global rend_vent; rend_vent = zeros(8760,1); %rendimiento en la ventilación

estancias = ["Cocina"; "Salón"; "Baño"; "Dormitorio 1"; "Dormitorio 2"];

global iHL_l; iHL_l = 2; %ganancias internas de calor por luces y
global iHL_a; iHL_a = 2; %ganancias de calor por aparatos eléctricos

% Ganacias de calor internas + calor de luz + calor de la gente en la casa
global QgP; QgP = 100*2*ones(8760,1); %calor de la gente; 2 personas
*100W/persona
global Qihg; Qihg = ones(8760,1); %inicializar vector de ganancias internas
de calor
orient_=[1 2 0 1 2]; %vector de orientaciones 1-->este; 2-->oeste; 0-->
habitación interior

% Histórico de temperaturas de suelo y techo
global T_suelo;
global T_techo;
T_suelo = (273+20)*ones(8760+23,5);
T_techo = (273+20)*ones(8760+36,10);
```

```

%Temperaturas a controlar
global T_air; T_air = (22+273)*ones(8760,5);

j=24; % Variable auxiliar para el bucle
Control = zeros(8760,5); %Vector para comprobar si la temperatura se
controla o no
for i=1:365 % Bucle para poner si las temperaturas se controlan o no
    Control(j:(j+23),:) = ones(24,5);%[zeros(6,5); ones(3,5); -1*ones(8,5);
ones(7,5)];
    j=j+24;
end

%% Variables de control
Q_flag = zeros(8760,5); %Flag para indicar si en la iteración anterior se
ha calentado o enfriado: 1 -->calentar; -1 -->enfriar
Q_heat = zeros(8760,5); % Necesidades caloríficas
Q_cool = zeros(8760,5); %Necesidades de enfriar
global cortinas; cortinas = zeros(8760,5); % Variable de control que indica
si las cortinas están echadas o no

%% Estancias

%Cocina
C_2_area = 2.85*2.85; %area del suelo
C_3_area = C_2_area;
C_9_area = C_2_area;
C_5_area = 1.35*2; %area de la ventana
C_paredes_area = [2.85 2.85].*3;% ((2.85-0.9)*3-C_5_area)/3 2.85].*3; %Área
de las paredes
C_F_vision = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0.1 0.05 0.05 0 0 0 0 0.1 0.1
0 0.1 0 0.05 0.05 0 0 0 0 0.1 0.1
0 0.1 0.1 0 1 0 0 0 0 0.1 0.1
0 0.1 0.1 1 0 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0.1 0.1 0 0 0 0 0 0 0.1
0 0.1 0.1 0 0 0 0 0 0.05 0];

V_c = "Este" ;
Areas_c = [0 %1aire
C_2_area %2 suelo
C_3_area %3 techo
C_5_area %4 cortinas
C_5_area %5 cristal interior
C_5_area %6 cristal exterior 7 pared fuera
0 %8aire entre cortina y cristal
C_9_area %9 techo exterior
C_paredes_area';%10 paredes (Interior Fachada)
];
%
```

```
%Sala
S_2_area = 3*2.85 ; %area del suelo
S_3_area = S_2_area;
S_9_area = S_2_area;
S_5_area = 1.35*2; %area de la ventana
S_paredes_area = [3 3 2.85 (2.85*3-S_5_area)/3].*3; %area de las paredes
S_F_vision = C_F_vision;
```

```
V_s = "Oeste" ;
Areas_s = [0 %aire
            S_2_area %suelo
            S_3_area %techo
            S_5_area %cortinas
            S_5_area %cristal interior
            S_5_area %cristal exterior
            0 %aire entre cortina y cristal
            S_9_area %techo exterior
            S_paredes_area';%paredes
            ];
```

```
%
```

```
%Baño
B_2_area = 1.95*1.35 ; %area del suelo
B_3_area = B_2_area;
B_9_area = B_2_area;
B_5_area = 0; %No hay cortinas
B_paredes_area = [1.35+1.95+1.95 0.4].*3; %area de las paredes
B_F_vision = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0 0.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0.5
               0 0.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.5
               0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
               0 0.1 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
```

```
V_b = 0; %no hay ventana, por lo que V_b = 0
Areas_b = [0 %aire
            B_2_area %suelo
            B_3_area %techo
            B_5_area %cortinas
            B_5_area %cristal interior
            B_5_area %cristal exterior
            0 %aire entre cortina y cristal
            B_9_area %techo exterior
            B_paredes_area';%paredes
            ];
```

```
%
```

```

%Dormitorio 1
D1_2_area = 2.85*3 ; %area del suelo
D1_3_area = D1_2_area;
D1_9_area = D1_2_area;
D1_5_area = 1.8*2; %area de la ventana
D1_paredes_area = [2.85*3 2.85*3 3*3-D1_5_area 3*1.95]; %area de las
paredes
D1_F_vision = 1/11*ones(11,11); % factores de visión inicializar
D1_F_vision = C_F_vision;

```

```

V_d1 = "Este" ;
Areas_d1 = [0 %1 aire
            D1_2_area %2 suelo
            D1_3_area %3 techo
            D1_5_area %4 cortinas
            D1_5_area %5 cristal interior
            D1_5_area %6 cristal exterior
            0 %8 aire entre cortina y cristal
            D1_9_area %9 techo exterior
            D1_paredes_area';%10 paredes
            ];

```

```

%
```

```

%Dormitorio 2
D2_2_area = 3.15*3 ; %area del suelo
D2_3_area = D2_2_area;
D2_9_area = D2_2_area;
D2_5_area = 1.8*2; %area de la ventana
D2_paredes_area = [3.15 3.15 1.95 (3*3-D2_5_area)/3].*3; %area de las
paredes
D2_F_vision = C_F_vision;

```

```

V_d2 = "Oeste" ;
Areas_d2 = [0 %1 aire
            D2_2_area %2 suelo
            D2_3_area %3 techo
            D2_5_area %4 cortinas
            D2_5_area %5 cristal interior
            D2_5_area %6 cristal exterior
            0 %8 aire entre cortina y cristal
            D2_9_area %9 techo exterior
            D2_paredes_area';% 10 paredes
            ];

```

```

%
```

```

%% =====
%                                     Declarar objetos
%=====

cocina = Estancia(Temp, V_c, Areas_c, C_F_vision, coef_abs,
orient_(1)); % 1
sala = Estancia(Temp, V_s, Areas_s, S_F_vision, coef_abs,
orient_(2)); % 2
bano = Estancia(Temp, V_b, Areas_b, B_F_vision, [0 0;0 0],
orient_(3)); % 3
d1 = Estancia(Temp, V_d1, Areas_d1, D1_F_vision, coef_abs,
orient_(4)); % 4
d2 = Estancia(Temp, V_d2, Areas_d2, D2_F_vision, coef_abs,
orient_(5)); % 5


%% =====
%                                     Importar los datos del excel de tiempo
%=====
%Cambiar 'Orientation' para elegir la orientación de la habitación a
analizar
%North:'CL' North-East: 'DM'; East: 'EN'; South-East: 'FO'; South'GP';
%South-West: 'HQ'; West: 'IR'; North-West: 'JS'; Horizontal: 'KT'
Orientacion1 = 'EN';
Orientacion2 = 'IR';
Orientacion3 = 'GP';

R1 = '5: ';
R2 = '8765';
Range1 = strcat(Orientacion1(1),R1,Orientacion1(1),R2) ;
Range2 = strcat(Orientacion1(2),R1,Orientacion1(2),R2) ;
Range3 = strcat(Orientacion2(1),R1,Orientacion2(1),R2) ;
Range4 = strcat(Orientacion2(2),R1,Orientacion2(2),R2) ;
Range5 = strcat(Orientacion3(1),R1,Orientacion3(1),R2) ;
Range6 = strcat(Orientacion3(2),R1,Orientacion3(2),R2) ;
OutTemp = xlsread('Typical climate data Netherlands-deBILT64-
65','A5:A8765'); % Temperatura exterior
OutTemp = OutTemp + 273;
DSRad_East = xlsread('Typical climate data Netherlands-deBILT64-
65',Range1); % Radiación solar directa
DfSRad_East = xlsread('Typical climate data Netherlands-deBILT64-
65',Range2); % Radiación difusa
DSRad_West = xlsread('Typical climate data Netherlands-deBILT64-
65',Range3); % Radiación solar directa
DfSRad_West = xlsread('Typical climate data Netherlands-deBILT64-
65',Range4); % Radiación difusa
DSRad_South = xlsread('Typical climate data Netherlands-deBILT64-
65',Range5); % Radiación solar directa
DfSRad_South = xlsread('Typical climate data Netherlands-deBILT64-
65',Range6); % Radiación solar directa

% j=9; % variable auxiliar para el bucle

```

```
% Control = zeros(8760,1); %Vector para comprobar si la temperatura se
controla o no
% for i=1:365 %8760 = 24*365
%     Control(j:(j+8),:) = ones(9,1);
%     j=j+24;
% end
```

```
%% =====
%           MÉTODO DE FACTORES DE RESPUESTA DEL SUELO
%=====
```

```
N = 23;
lambda = 0.13; % W/mK
Cp_cf = 10.47e2; %840; %J/kgK
rho = 500; %kg/m3
global X_suelo;
X_suelo = ones(N,1); %Inicializar vector de RESPONSE FACTOR
X_suelo(1,1) = 2/pi*sqrt(lambda*rho*Cp_cf/1800);
error = 0;

for j=2:N %Calcular el resto de factores X n>0
    X_suelo(j,1) = -X_suelo(1,1)*(2*sqrt(j-1)-sqrt(j)-sqrt(j-2));
end

for j=1:N %Calculo del error
    error = error + X_suelo(j,1);
end

for j = 3:N %Corregir cada factor para n>1
    X_suelo(j,1) = X_suelo(j,1) - error/(N-2);
end
```

```
%% =====
%           MÉTODO DE FACTORES DE RESPUESTA DEL TECHO
%=====
```

```
global X_techo;
X_techo = [4.612847 3.925070
-2.764944 -2.299253
-0.476747 -0.378288
-0.245092 -0.195861
-0.153975 -0.125306
-0.106497 -0.089228
-0.078391 -0.067830
-0.060378 -0.053850
-0.048125 -0.044057
-0.039375 -0.036824
-0.032864 -0.031253
-0.027845 -0.026820
-0.023858 -0.023201
-0.020612 -0.020186
-0.017916 -0.017636
-0.015641 -0.015453
-0.013698 -0.013573
-0.012024 -0.011934
-0.010571 -0.010507
-0.009305 -0.009257
-0.008197 -0.008160
-0.007225 -0.007196
```



```

-0.006371 -0.006348
-0.005620 -0.005601
-0.004958 -0.004942
-0.004375 -0.004362
-0.003861 -0.003849
-0.003007 -0.002999
-0.002654 -0.002647
-0.002343 -0.002336
-0.001825 -0.001820
-0.001611 -0.001607
-0.001422 -0.001418
-0.001255 -0.001252
-0.001108 -0.001105
-0.000978 -0.000975];

```

CLASE VENTANA

```

classdef Ventana
    properties
        Orientacion;
        Coef_absorcion_ext;
        Coef_absorcion_int;
        Area;
    end

    methods
        function obj = Ventana(V) % V es un vector
            obj.Orientacion = V(1);
            obj.Coeff_absorcion_ext = V(2:3);
            obj.Coeff_absorcion_int = V(4:5);
            obj.Area = V(6);
        end
    end
end

```

CLASE ESTANCIA

```

classdef Estancia
    %UNTITLED2 Summary of this class goes here
    % Detailed explanation goes here

    % Public properties
    properties (GetAccess = public)
        Temp; % Vector de temperaturas de los nodos
        ventana; % Objeto de clase ventana. Inicializado en el constructor
        Areas; %Vector con valores de áreas con orden identico a ventor
TEMP
        F_vision; % Matriz de factores de vision etre nodos
        Coef_Adsorcion; % Coeficientes de absorción de radiación [con
persiana, sin persiana]
        orient; %Orientación de la estancia
    end

    % Private properties
    properties (GetAccess = private)

    end

    methods
        % Constructor
        function obj = Estancia(Temp_, V_, Areas_, F_vision_,
Coef_Adsorcion_, orient_)
            obj.Temp = Temp_; % Vector de Temperaturas
            obj.ventana = Ventana([V_ Coef_Adsorcion_(1,:)
Coef_Adsorcion_(2,:) Areas_(5)]); % Parámetros de ventana
            obj.Areas = Areas_;
            obj.F_vision = F_vision_;
            obj.Coef_Adsorcion = Coef_Adsorcion_;
            obj.orient = orient_;
        end

        %Build matrix
        function [matrix_A, matrix_B] = build_matrix(obj,A, B, i, j,
Ambiente, conexion, T_air, Estancia)

            % 1. A
            % 2. B
            % 3. i: inicio de inserción en matriz A j:
hora del año
            % 4. Ambiente: vector 1 x 3 que incluye
[temperatura_exterior radiación_este radiación_oeste]
            % 5. conexion: vector 1 x 5 que contiene valores
indicando con qué
            % estancias se intercambia aire. Si el número es el
mismo que
            % el de la estancia, el efecto es nulo.
            % 6. T_air: matriz 8760 x 5 que contiene las
referencias de temperatura de las 5 estancias en cada hora del año
            % 7. Estancia: número de la estancia
            %

            % 11 Nodos por cada estancia
            matrix_A = A;
            matrix_B = B;
    end
end

```

```

%Declarar variables globales usadas
global M_aire;
global alfa_conv_ext;
global alfa_conv_int;
%global M_flujo_ventana;
global alfa_abs_calor;
global alfa_rad;
global Rp;
global C_p;
global rend_vent;
global Qgains;
global X_suelo;
global X_techo;
global T_suelo;
global T_techo;

switch Estancia %Configurar variables para construir las
matrices conforme a la estancia
    %1. Cocina
    case 1

        %2. Sala
    case 2
        Qgains = 0;
        %3. Baño
    case 3
        Qgains = 0;
        %4. Dormitorio 1
    case 4
        Qgains = 0;
        %5. Dormitorio 2
    case 5
        Qgains = 0;
    otherwise
        Qgains = 0;
end

% Movimiento aire entre estancias. Emplea el vector "conexión",
% el cual indica con qué estancias se intercambia aire.
Intercambio_aire = 0;
for est=1:5 % Valor acumulado del calor intercambiado con otras
habitaciones
    Intercambio_aire = Intercambio_aire +
M_aire*C_p*[T_air(Estancia) - T_air(conexion(est))];
end

%% Código aplicado a sin cortinas

%código aplicado a sin cortinas

```

```

        % Matriz B
        matrix_B(i)= Qgains -Intercambio_aire -
T_air(Estancia)*(alfa_conv_int*(obj.Areas(3)+obj.Areas(5)+obj.Areas(2)+obj.
Areas(9)+obj.Areas(10))) - (1-rend_vent(j,1))*M_aire*C_p*(T_air(Estancia)-
Ambiente(1)); %B(1,1)
        matrix_B(i+1)=
obj.Areas(2)*(alfa_conv_int*T_air(Estancia)+alfa_abs_calor/obj.Areas(2)*obj.
Areas(4)*Ambiente(2+obj.orient)*(1-obj.Coeff_Adsorcion(2,2))*(1-
obj.Coeff_Adsorcion(2,1))- X_suelo(end:-
1:2,1)'*T_suelo(j+1:j+22,Estancia)); % B(1,2)
        matrix_B(i+2)= obj.Areas(3)*(alfa_conv_int*T_air(Estancia)-
(X_techo(end:-1:2,1)'*T_techo(j+1:j+35,Estancia*2-1)-X_techo(end:-
1:2,2)'*T_techo(j+1:j+35,Estancia*2))); % B(1,3)
        matrix_B(i+3)= 0; % B(1,4)
        matrix_B(i+4)= obj.Areas(5)*(Ambiente(2+obj.orient)*(1-
obj.Coeff_Adsorcion(2,1))*obj.Coeff_Adsorcion(2,2)+alfa_conv_int*T_air(Estanc
ia)); % B(1,5)
        matrix_B(i+5)=
Ambiente(2+obj.orient)*obj.Coeff_Adsorcion(2,1)*obj.Areas(4)+alfa_conv_ext*o
bj.Areas(4)*Ambiente(1); % B(1,6)
        matrix_B(i+6)=
Ambiente(2+obj.orient)*obj.Areas(10)+alfa_conv_ext*obj.Areas(10)*Ambiente(1
)+alfa_rad*Ambiente(1)*obj.Areas(10); % B(1,7)
        matrix_B(i+7)= 0; % B(1,8)
        matrix_B(i+8)= obj.Areas(3)*(X_techo(end:-
1:2,1)'*T_techo(j+1:j+35,Estancia*2-1)-X_techo(end:-
1:2,2)'*T_techo(j+1:j+35,Estancia*2)+ Ambiente(5)+
alfa_conv_ext*Ambiente(1)); % B(1,9)
        matrix_B(i+9)= alfa_conv_int*obj.Areas(10)*T_air(Estancia); %
B(1,10)
        matrix_B(i+10)= alfa_conv_int*obj.Areas(9)*T_air(Estancia); %
B(1,11)

        % Nodo 1 -- Aire
        matrix_A(i,i)=1; %A(1,1)
        matrix_A(i,i+1)= -alfa_conv_int*obj.Areas(2); % A(1,2)
        matrix_A(i,i+2)= -alfa_conv_int*obj.Areas(3); % A(1,3)
        matrix_A(i,i+4)= -alfa_conv_int*obj.Areas(4); % A(1,4)
        matrix_A(i,i+9)= -alfa_conv_int*obj.Areas(9); % A(1,10)
        matrix_A(i,i+10)= -alfa_conv_int*obj.Areas(10); % A(1,11)

        % Nodo 2 -- Suelo
        matrix_A(i+1,i+1)=
obj.Areas(2)*(X_suelo(1,1)+alfa_conv_int+alfa_rad*(obj.F_vision(2,3)+obj.F_
vision(2,10)+obj.F_vision(2,11)+obj.F_vision(2,4))); % A(1,2)
        matrix_A(i+1,i+2)= -alfa_rad*obj.Areas(2)*obj.F_vision(2,3); %
A(1,3)
        matrix_A(i+1,i+9)= -
alfa_rad*obj.Areas(2)*obj.F_vision(2,10); % A(1,10)
        matrix_A(i+1,i+10)= -
alfa_rad*obj.Areas(2)*obj.F_vision(2,11); % A(1,11)
        matrix_A(i+1,i+4)= -alfa_rad*obj.Areas(2)*obj.F_vision(2,4); %
A(2,5)

        % Nodo 3 -- Techo
        matrix_A(i+2,i+1)= -alfa_rad*obj.Areas(3)*obj.F_vision(3,2); %
A(1,2) Suelo
        matrix_A(i+2,i+2)=
obj.Areas(3)*(alfa_rad*obj.F_vision(3,11)+alfa_conv_int+
X_techo(1,1)+alfa_rad*obj.F_vision(3,2)+alfa_rad*obj.F_vision(3,4)+alfa_rad
*obj.F_vision(3,10)); % A(1,3)

```

```

matrix_A(i+2,i+4)= -alfa_rad*obj.Areas(3)*obj.F_vision(3,5); %
A(1,4)
matrix_A(i+2,i+8)= -obj.Areas(3)*X_techo(1,2); % A(1,9)
matrix_A(i+2,i+9)= -alfa_rad*obj.Areas(3)*obj.F_vision(3,10); %
A(1,10)
matrix_A(i+2,i+10)= -
alfa_rad*obj.Areas(3)*obj.F_vision(3,11); % A(1,11)

% Nodo 9 -- Tejado
matrix_A(i+8,i+2)= -obj.Areas(3)*X_techo(1,1); % A(1,3)
matrix_A(i+8,i+8)=
obj.Areas(3)*X_techo(1,2)+alfa_conv_ext*obj.Areas(3); % A(1,9)
%matrix_A(i+8,i+2)= -obj.Areas(3)*Rp; % A(1,3)
%matrix_A(i+8,i+8)=
obj.Areas(3)*Rp+alfa_conv_ext*obj.Areas(3); % A(1,9)

% Nodo 11 -- Pared interior
matrix_A(i+10,i+1) = -
alfa_rad*obj.Areas(9)*obj.F_vision(11,2); % A(1,2)
matrix_A(i+10,i+2)= -
alfa_rad*obj.Areas(9)*obj.F_vision(11,3); % A(1,3)
matrix_A(i+10,i+10)=
alfa_rad*obj.Areas(9)*obj.F_vision(11,2)+alfa_rad*obj.Areas(9)*obj.F_vision
(11,3)+alfa_conv_int*obj.Areas(9); % A(1,11)

if (Estancia == 3) % Si la estancia es el baño, ponemos a 1 la
parte de la diagonal principal para que A sea invertible
matrix_B(i) = -Intercambio_aire -
T_air(Estancia)*(alfa_conv_int*(obj.Areas(3)+obj.Areas(2)+obj.Areas(9))); %
B(1,1);
matrix_B(i+1)= obj.Areas(2)*(alfa_conv_int*T_air(Estancia)-
X_suelo(end:-1:2,1)'*T_suelo(j+1:j+22,Estancia)); % B(1,2)
matrix_A(i+1,i+1)=
obj.Areas(2)*(X_suelo(1,1)+alfa_conv_int+alfa_rad*(obj.F_vision(2,3)+obj.F_
vision(2,11))); % A(1,2)
matrix_A(i:i+10,i+3) = zeros(11,1); %Cortinas
matrix_A(i+3,i+3) = 1;
matrix_A(i,i+10)= -alfa_conv_int*obj.Areas(9); % A(1,11)
matrix_B(i+3) = 0;
matrix_A(i+2,i+2)=
obj.Areas(3)*(alfa_rad*obj.F_vision(3,11)+alfa_conv_int+
X_techo(1,1)+alfa_rad*obj.F_vision(3,2)); % A(1,3)
matrix_A(i:i+10,i+4) = zeros(11,1); %Cristal inerior
matrix_A(i+4,i+4) = 1;
matrix_B(i+4) = 0;
matrix_A(i:i+10,i+5) = zeros(11,1); %Cristal exterior
matrix_A(i+5,i+5) = 1;
matrix_B(i+5) = 0;
matrix_A(i:i+10,i+6) = zeros(11,1); %Pared Exterior
matrix_A(i+6,i+6) = 1;
matrix_B(i+6) = 0;
matrix_A(i:i+10,i+7) = zeros(11,1); % Aire entre cortinas y
cristal
matrix_A(i+7,i+7) = 1;
matrix_B(i+7) = 0;
matrix_B(i+8)= obj.Areas(3)*(X_techo(end:-
1:2,1)'*T_techo(j+1:j+35,Estancia*2-1)-X_techo(end:-
1:2,2)'*T_techo(j+1:j+35,Estancia*2)+ Ambiente(5)+
alfa_conv_ext*Ambiente(1)); % B(1,9)

```

```

        matrix_A(i:i+10,i+9) = zeros(11,1); % Fachada interior
        matrix_A(i+9,i+9) = 1;
        matrix_B(i+9) = 0;
        matrix_B(i+10)=
alfa_conv_int*obj.Areas(9)*T_air(Estancia); % B(1,10)

    else

        % Nodo 4 -- Cortinas
        matrix_A(i:i+10,i+3) = zeros(11,1);
        matrix_A(i+3,i+3)= 1;

        % Nodo 5 -- Cristal interior
        matrix_A(i+4,i+4)=
obj.Areas(4)*(alfa_conv_int+alfa_rad*(obj.F_vision(5,3)+obj.F_vision(5,6)+o
bj.F_vision(5,2))); % A(1,5)
        matrix_A(i+4,i+5)= -
alfa_rad*obj.Areas(4)*obj.F_vision(5,6); % A(1,6)
        matrix_A(i+4,i+2)= -
alfa_rad*obj.Areas(4)*obj.F_vision(5,3); % A(1,3)
        matrix_A(i+4,i+1)= -
alfa_rad*obj.Areas(4)*obj.F_vision(5,2); % A(5,2)

        % Nodo 6 -- Cristal exterior
        matrix_A(i+5,i+4)= -
alfa_rad*obj.Areas(4)*obj.F_vision(6,5); % A(1,5)
        matrix_A(i+5,i+5)=
alfa_rad*obj.Areas(4)*obj.F_vision(6,5)+alfa_conv_ext*obj.Areas(4); %
A(1,6)

        % Nodo 7 -- Pared exterior
        matrix_A(i+6,i+6)=
obj.Areas(10)*(alfa_conv_ext+1/Rp+alfa_rad); % A(1,7)
        matrix_A(i+6,i+9)= -obj.Areas(10)/Rp; % A(1,11)

        % Nodo 8 -- Aire entre cortinas y pared
        matrix_A(i:i+10,i+7) = zeros(11,1);
        matrix_A(i+7,i+7)= 1;

        % Nodo 10 -- Parte iterior y la fachada
        matrix_A(i+9,i+1) = -
alfa_rad*obj.Areas(10)*obj.F_vision(10,2); % A(1,2)
        matrix_A(i+9,i+2)= -
alfa_rad*obj.Areas(10)*obj.F_vision(10,3); % A(1,3)
        matrix_A(i+9,i+6)= -obj.Areas(10)/Rp; %A(1,7)
        matrix_A(i+9,i+9)=
alfa_rad*obj.Areas(9)*obj.F_vision(10,2)+alfa_rad*obj.Areas(9)*obj.F_vision
(10,3)+alfa_conv_int*obj.Areas(10)+obj.Areas(10)/Rp; % A(1,10)

    end
end
end
end

```

SIMULACIÓN

%% SIMULACIÓN

%% Limpiar y cargar

clear all

close all

clc

parametros % Cargar parámetros desde Script

%% Declaración de variables globales

global Qihg;

global QgP;

global Qgains;

global rend_vent;

global cortinas;

global T_air;

OutTemp=OutTemp+0;

%% BUCLE DE CONTROL

% [A]*[T] = [B]

A = zeros(55,55);

global T; T = (273+22)*ones(8760,55); % Matriz de temperaturas

B = zeros(55,1);

Count = 0; %Contador de iteraciones

Limit = 2; %Límite de cuenta para salir del bucle while de control

while Count < Limit % Bucle de control

Count = Count + 0.2; %Incrementar el contador

for i=1:8760 %Bucle para pasar por todas las horas

% Construir vector de condiciones ambientales para hora i

Ambiente = [OutTemp(i,1) 0 (DSRad_East(i,1)+DfSRad_East(i,1))
(DSRad_West(i,1)+DfSRad_West(i,1)) (DSRad_South(i,1)+DfSRad_South(i,1))];

%% Modificar variables de control de la vivienda

% 1. Configuración de parámetros según las cortinas están echadas o
no

for j=1:5

if 0%(Ambiente(2+orient_(j))==0) %&&(T_air(i,j)==(273+20))
cortinas(i,j) = 1;

end

end

% 2. Configuración de parámetros de recuperación de calor en la
ventilación.

if (24<OutTemp(i)<20)

rend_vent(i) = 1;

else

rend_vent(i)=0;

end

```

    % 3. Cálculo de aportaciones de calor de personas
    Qgains= Qihg(i)*(iHL_l+iHL_a)*cocina.Areas(2)+QgP(i); %[W/hour]
    Ganancias internas de calor en salón.

%4. Configuración de paneles aislantes
if 1 %si se emplean paneles aislantes
    if T(i,9)>293
        alfa_conv_ext = 25;
    else
        alfa_conv_ext = 7.5;
    end
end

%% CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ A y B

% 1. Cocina
[A,B] = cocina.build_matrix(A,B,1,i,Ambiente,[1 2 1 1
1],T_air(i,:),1);
% 2. Sala
[A,B] = sala.build_matrix(A,B,12,i,Ambiente,[1 2 3 4
5],T_air(i,:),2);
% 3. Baño
[A,B] = bano.build_matrix(A,B,23,i,Ambiente,[3 2 3 3
3],T_air(i,:),3);
% 4. Dormitorio 1
[A,B] = d1.build_matrix(A,B,34,i,Ambiente,[4 2 3 4
5],T_air(i,:),4);
% 5. Dormitorio 2
[A,B] = d2.build_matrix(A,B,45,i,Ambiente,[5 2 3 4
5],T_air(i,:),5);

%% Solve system [A][T]=[B]
T_aux = A\B; % Resolver el sistema
T(i,:)=T_aux';
T_techo(i+36,:) = [T(i,3) T(i,9) T(i,14) T(i,20) T(i,25) T(i,31)
T(i,36) T(i,42) T(i,47) T(i,53)];
T_suelo(i+23,:) = [T(i,2) T(i,13) T(i,24) T(i,35) T(i,46)];

%% Modificar variables de Control para las 5 estancias
for j=1:5
    if Control(i,j) == 1 && Count <= Limit %Comprobar si hay que
    controlar temperatura
        if (T(i,j*11-10)<0) && (Q_flag(i,j)>=0) %Se
necesita calefacción
            T_air(i,j)=T_air(i,j)-0.2; %Descender medio grado para
reducir necesidad de calefacción
            Q_flag(i,j) = 1;
            if T_air(i,j)<=(273+20) Q_heat(i,j) = T(i,j*11-10);
end

% Calentar abriendo ventanas

```



```

        if (T_air(i,j) <
Ambiente(1)) && (Ambiente(1) <= (273+24)) %si la temperatura exterior es mayor
que la interior se abren las ventanas
            T_air(i,j) = Ambiente(1);
            Q_heat(i,j) = 0; % No se gasta calefacción
        elseif (Ambiente(1) > (273+24))
            T_air(i,j) = (273+24);
        else
            Q_heat(i,j) = T(i,j*11-10);
        end

        elseif (T(i,j*11-10) > 0) && (Q_flag(i,j) <= 0) %Se necesita
refrigeración

T_air(i,j) = T_air(i,j) + 0.2; %Incrementar medio
grado para reducir necesidad de refrigeración
            Q_flag(i,j) = -1;
            if T_air(i,j) >= (273+24) Q_cool(i,j) = T(i,j*11-10);
        end

        %Refrigerar abriendo ventanas
        if (T_air(i,j) >
Ambiente(1)) && (Ambiente(1) >= (273+20)) %si la temperatura exterior es menor
que la interior se abren las ventanas
            T_air(i,j) = Ambiente(1);
            Q_cool(i,j) = 0; % No se gasta calefacción
        elseif (Ambiente(1) < (273+20))
            T_air(i,j) = (273+20);
        else
            Q_cool(i,j) = T(i,j*11-10);
        end
    else
        Q_cool(i,j) = 0;
        Q_heat(i,j) = 0;
    end
end
end
end

end

end

%% Compensar calentamiento y enfriamiento con corrientes de aire.
Q_heat_casa = -(sum(Q_heat') + sum(Q_cool'));
Q_cool_casa = -Q_heat_casa;

for i = 1:8760
    if Q_heat_casa(i) < 0
        Q_heat_casa(i) = 0;
    end
    if Q_cool_casa(i) < 0
        Q_cool_casa(i) = 0;
    end
end
end

```

```

%% =====
%                               Visualización del resultado
% =====

T_air = T_air - 273; %

%
% Demanda calorífica
figure(1);
t=1:8760; %Vector del tiempo [horas] (hay 8760 horas el año)
plot(t,Q_heat_casa,'r'); % Demanda de calor
hold on
plot(t,Q_cool_casa,'b'); % Demanda de frío
hold off
title('Demanda de calor y de frío');
grid on
ylabel('Calor [W]');
xlabel('tiempo [horas]');
legend('Calor','Frío');
%axis([0 8760 10000 12500])
%

%
%Temperaturas
T(:,[1:25 31 33:55]) = T(:,[1:25 31 33:55])-273; %Restar 273 a todos menos
a algunos del baño
i=1;
j=1;
for i=1:8760 %Bucles para insertar en la matriz de temperauras las del aire
    for j=1:5
        if cortinas(i,j)==0
            T(i,j*11-7)=T_air(i,j); %cortina
            T(i,j*11-3)=T_air(i,j); %aire entre cort y cristal
        end
        T(i,j*11-10)= T_air(i,j);
    end
end

%Hacer la media de temperaturas de cada día
T_aux = T;%Guardar
clear T;
T = zeros(365,55);
Q_h_diario = zeros(365,1);
Q_c_diario = zeros(365,1);
T_ext =zeros(365,1);
i=1;%reinicializar i al inicio del dataset
while i<8760 %Bucles para hacer la media diaria y que el gráfico salga más
claro visualmente
    for j=1:55 %Hacer la media de las 24 horas para las 55 columnas
        T((i+23)/24,j) = mean(T_aux(i:i+23,j));
    end
    T_ext((i+23)/24,1) = mean(OutTemp(i:i+23,1))
    Q_h_diario((i+23)/24) = mean(Q_heat_casa(i:i+23,1));
    Q_c_diario((i+23)/24) = mean(Q_cool_casa(i:i+23,1));
    i = i + 24; %Incrementar 24 horas
end

%
% Demanda calorífica
figure(5);

```

```

t=1:365; %Vector del tiempo [horas] (hay 8760 horas el año)
plot(t,Q_h_diario,'r'); % Demanda de calor
hold on
plot(t,Q_c_diario,'b'); % Demanda de frío
%Q_h_d = Q_h_diario;
%Q_c_d = Q_c_diario;
plot(t,Q_h_d,'r:'); % Demanda de calor caso base
plot(t,Q_c_d,'b:'); % Demanda de frío caso base
hold off
title('Demanda de calor y de frío');
grid on
ylabel('Calor [W]');
xlabel('tiempo [días]');
legend('Calor','Frío');
axis([0 365 0 1250])
%
% Poner a temperatura del aire las persianas para que quede mejor el
% gráfico
for i=1:8760
    for j=1:5
        if (cortinas(i,j) == 0) && i>1
            T_aux(i,j*11-7)= T_air(i,j);
            T_aux(i,j*11-3)= T_air(i,j);
        end
    end
end

figure(2); %figura que incluirá las temperaturas
title('Demanda de calor y de frío');
t = 1:365;
for i=1:5 %Bucle para generar los gráficos de las 5 habitaciones
    subplot(2,3,i)
    plot(t,T(:,i*11-10));%Aire
    hold on
    plot(t,T(:,i*11-9));%Suelo
    plot(t,T(:,i*11-8));%Techo
    plot(t,T(:,i*11-2));%Tejado
    plot(t,T(:,i*11)); %Pared interior
    plot(t,T_ext-273); %Tempratura exterior
    if i~=3
        plot(t,T(:,i*11-1)); %Fachada interior
        plot(t,T(:,i*11-7),':'); %Cortinas
        plot(t,T(:,i*11-6),':'); %Cristal interior
        plot(t,T(:,i*11-5),':'); %Cristal exterior
        plot(t,T(:,i*11-4)); %Pared exterior
        plot(t,T(:,i*11-3),':'); %Aire entre cortinas y cristal
    end

    hold off
    title({'Temperaturas medias: ', estancias(i)});
    xlabel('tiempo [dias]');
    ylabel('temperatura [°C]');
    axis([0 365 -10 30])
end
legend('Aire', 'Suelo', 'Techo', 'Tejado', 'Pared interior','Exterior',
'Fachada interior', 'Cortinas','Cirstal int.', 'Cristal ext.', 'Pared
exterior', 'Aire entre cortinas y cristal');

```

```

%
figure(3)
i=2;
t = 1:365;
plot(t,T(:,i*11-10));%Aire
hold on
plot(t,T(:,i*11-9));%Suelo
plot(t,T(:,i*11-8));%Techo
plot(t,T(:,i*11-2));%Tejado
plot(t,T(:,i*11)); %Pared interior
plot(t,T_ext-273); %Tempratura exterior
if i~=3
    plot(t,T(:,i*11-1)); %Fachada interior
    plot(t,T(:,i*11-7), ':'); %Cortinas
    plot(t,T(:,i*11-6), ':'); %Cristal interior
    plot(t,T(:,i*11-5), ':'); %Cristal exterior
    plot(t,T(:,i*11-4)); %Pared exterior
    plot(t,T(:,i*11-3), ':'); %Aire entre cortinas y cristal
end

hold off
title({'Temperaturas medias: ', estancias(i)});
xlabel('tiempo [dias]');
ylabel('temperatura [°C]');
axis([0 365 -10 30])
legend('Aire', 'Suelo', 'Techo', 'Tejado', 'Pared interior','Exterior',
'Fachada interior', 'Cortinas','Cirstal int.', 'Cristal ext.', 'Pared
exterior', 'Aire entre cortinas y cristal');

%

%Para visualizar mejor UNA SOLA ESTANCIA
figure(3)
t=1:8760;
i=4; %Elegir habitación: 1:cocina; 2:salón; 3: baño; 4:dormitorio 1;
5:dormitorio 2;
if i~=3
    plot(t,T_aux(:,i*11-7), ':');%Cortinas , 'Cortinas'
    hold on
    plot(t,T_aux(:,i*11-6), ':', 'Color', [2 203 217]./255);%Cristal interior
    plot(t,T_aux(:,i*11-5), ':'); %Cristal exterior
    plot(t,T_aux(:,i*11-4), ':'); %Pared exterior , 'Pared exterior',
    plot(t,T_aux(:,i*11-3), ':'); %Aire entre cortinas y cristal 'Aire
entre cortinas y cristal'
    plot(t,T_aux(:,i*11-1)); %Fachada interior
end
plot(t,T_aux(:,i*11-8), 'Color', [83 117 22]./255);%Techo
hold on
plot(t,T_aux(:,i*11-10));%Aire
plot(t,T_aux(:,i*11-9));%Suelo
plot(t,T_aux(:,i*11-2)); %Tejado
plot(t,T_aux(:,i*11)); %Pared interior
plot(t,OutTemp-273, 'Color', [11 40 77]./255); % Temperatura exterior
hold off
title('Temperatura de la sala: ')% ,num2str(i));
xlabel('tiempo [horas]');
ylabel('temperatura [°C]');

```

```
legend('Cortinas', 'Cristal int', 'Cristal ext.', 'Pared exterior', 'Aire  
entre cortinas y cristal', 'Fach.  
interior', 'Techo', 'Aire', 'Suelo', 'Tejado', 'Pared interior', 'Exterior');  
if i==3 legend('Techo', 'Aire', 'Suelo', 'Tejado', 'Pared  
interior', 'Exterior'); end
```

%

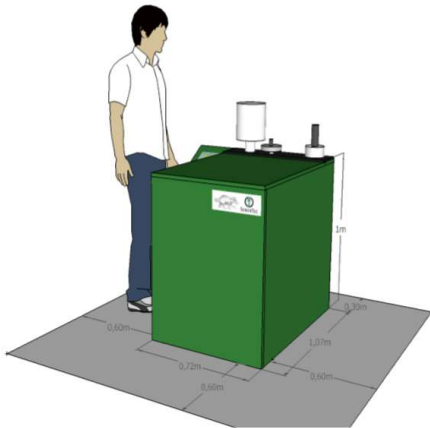
EQUIPOS PROPUESTOS

Equipos	Precio	Columna2	Potencia nominal	Generación anual	Link
Paneles exteriores	56€/m ²	1.260 €	-	-	https://www.acuatroarquitectos.com/rehabilitacion-de-fachadas-evaluacion-de-sistemas/
Inyección de aislante en pared	-	600 €	-	-	http://www.mimbrea.com/precio-aislamiento-celulosa-insuflada-cuanto-vale/
Bombas de calor	2.970 €	2.970 €	3,5-4,5 KW	-	https://www.mitsubishielectric.es/aire-acondicionado/productos/sistemas-power-inverter-0 https://tuclimatizaciononline.es/bomba-de-calor-aerotermica-mitsubishi-suhz-sw45va-ersd-vm2c.html
Suelo radiante	50€/m ²	2.150 €	-	-	Se debe pedir presupuesto. Media de 50 50€/m2
Kit solar	1.705 €	1.705 €	3000W	1,97MWh	https://autosolar.es/kit-solar-aislada/kit-solar-instalacion-aislada-3000w-24v-5400whdia
Generador Eólico	1.280 €	1.280 €	1000W	4,38MWh	https://www.damiasolar.com/productos/iluminacion/aerogenerador-ecosolar-aero-1000-24v-potencia-max-3000w_da2020_110
Acumuladores de calor	155 €	155 €	-	-	https://www.gasfriocalor.com/deposito-de-inercia-ibaiondo-50-ar-a http://grupobiosan.com/calderas-de-biomasa/calderas-de-biomasa-policombustible/calderas-de-biomasa-policombustible-gama-domestica-20-35/caldera-de-biomasa-policombustible-gg25k-eco.html
Caldera biomasa	2.599 €	2.599 €	26,69K	-	

Hoja de especificaciones caldera de biogás:

Senertec DACHS G/F 5.5

5,5 kWe


Modelo	Motor: SACHS monocil.	Potencia eléctrica	Rendimiento eléctrico	Potencia térmica	Rendimiento térmico	Consumo	Rendimiento global
DACHS G/F 5.5	Mezcla pobre Catalizador oxidación	5,5 kW	26.8%	12,5 kW	61.0%	20,5 kW 2,1 m³/h*	86.8%

Potencia según ISO 3046-1/DIN 6271 a cos phi=0.9
Generador asíncrono refrigerado por agua

Dimensiones

Largo	1.060 mm
Ancho	720 mm
Alto	1.000 mm
Peso	530 kg

Datos adicionales

Cilindrada	578 cm³
Nivel sonoro a 1 m	52-56 dB(A)
Presión de alimentación de gas	20 - 50 mbar
Temperaturas imp/ret	83 / 70 °C
Rpm	2.450 r/min
Tensión	3 x 400 V / 50Hz

Mantenimiento

Intervalo de mantenimiento	3.500 h
Overhaul	Según desgaste

Emisiones

<TA-Luft

NOx < 350 mg/Nm³ @ O₂ = 5 %
CO < 150 mg/Nm³ @ O₂ = 5 %

Control

Unidad Senertec MSR2 Montada en armario eléctrico y de control lateral



Funciones:

- Control y supervisión continua del equipo
- Sincronismo y vigilancia de red
- Control por demanda térmica
- Interfaz de usuario, operador y mantenedor
- Telegestión opcional a través de internet

Ventajas

- Líder europeo en ventas. Más de 22.000 unidades instaladas.
- Eficiente y versátil. Puede integrarse fácilmente en cualquier instalación térmica.
- Muy compacto gracias al generador refrigerado por agua y a un óptimo diseño.

- Bajo nivel de emisiones gracias al uso de catalizador.
- Control flexible y sencillo a través de la unidad MSR2.
- Mínimo nivel sonoro.

Construcción: Módulo compacto de microgeneración compuesto por motor monocilíndrico a gas de 578 cm³ para operación con mezcla pobre, acoplado directamente mediante transmisión amortiguada a un generador asíncrono refrigerado por agua de 3x400V a 50 Hz preparado para trabajo en paralelo con la red. Motor y generador montados elásticamente sobre bastidor de acero con bandeja inferior de recogida de líquidos. Circuito de recuperación de calor con paso directo por generador, motor y evacuación de gases de escape incluyendo bomba de circulación propia y termostato de ajuste de la temperatura de salida. Incluye grupo de regulación de gas a partir de presión de suministro 20-50 mbar y salida de humos con catalizador de oxidación y silenciador. Unidad de conexiones y regulación Senertec MSR2 con interfaz en castellano y opción a supervisión remota a través de modem con instrumentación completa para operación automática gobernada por demanda térmica y/o eléctrica. Todo el conjunto se monta en un encapsulado de protección y aislamiento acústico compuesto de paneles desmontables. El suministro incluye latiguillos flexibles y válvulas de corte para las conexiones de agua y gas.

Sujeto a modificaciones

Mayo 2011

ESPECIFICACIONES DE CÁLCULOS:

Columna1	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Gasto calefacción antes [MWh]	4,37	4,37	4,37	4,37
Gasto calefacción después [MWh]	4,37	3,39	3,39	4,37
Gasto en agua sanitaria [MWh]	0,93	0,93	0,93	0,93
Ahorro electricidad [MWh]	0	0	2,03	1,05
Coste total antes calefacción+ agua caliente	336,17 €	336,17 €	336,17 €	336,17 €
Coste total después	155,05 €	126,39 €	0,00 €	0,00 €
Ahorro electricidad	0,00 €	0,00 €	357,09 €	242,47 €
Ahorro total anual	181,13 €	209,78 €	693,26 €	578,65 €
Total	3.124,99 €	4.984,99 €	7.969,99 €	6.109,99 €
Años aproximados para amortización	17,25	23,76	11,50	10,56

Precio Gas Natural	0,05371 €/KW·h 51,36€/año tipo fijo
Ahorro electricidad	120 €/año por cambiar potencia de 3,5 a 1,1KW 0,116955 €/KW·h
Consumo Agua caliente por persona	22 L
Consumo Agua Total	$22l \cdot 2personas \cdot Cp \cdot AT \cdot \frac{365}{1000}$ KW · h/año 932 KW·h/año

MATRICES

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{IN} \cdot A_{Suelo} & -\alpha_{IN} \cdot A_{Techo} & -\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_{IN} \cdot A_{PI} & -\alpha_{IN} \cdot A_{PF} \\ \alpha_{IN} \cdot A_{Suelo} & +\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-3} & & & & & & & & & \\ 0 & +\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-11} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-10} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-11} \\ +\alpha_{Rad} \cdot A_{Suelo} \cdot F_{2-10} & +A_{Suelo} \cdot X_0 & & & & & & & & & \\ & \alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-4} & +\alpha_{IN} \cdot A_{Techo} & & & & & & & & \\ 0 & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-2} & +\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-2} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-4} & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{Techo} \cdot Y_0 & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-10} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-11} \\ +\alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-10} & \alpha_{Rad} \cdot A_{Techo} \cdot F_{3-11} & +A_{Techo} X_0 & & & & & & & & \\ & \alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-3} & +\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-5} & 0 & 0 & -\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-3} & +\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & +\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{4-5} & & & & & & \\ & \alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-6} & +\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-6} & 0 & -\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-4} & +\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{5-4} & & & & & & \\ & \alpha_{Out} \cdot A_{Ventana} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{6-5} & +\alpha_{Rad} \cdot A_{Ventana} \cdot F_{6-5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & \alpha_{Out} \cdot A_{Ventana} & +R_p \cdot A_{PF} & 0 & 0 & -R_p \cdot A_{PF} & 0 \\ & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & -\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & 0 & 0 & 2 \cdot \alpha_{IN} \cdot A_{Ventana} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & +M_{Aire\ ventana} \cdot C_p & & & \\ 0 & 0 & -A_{Techo} X_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{Techo} \cdot Y_0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & +\alpha_{Out} \cdot A_{Techo} & & \\ 0 & -\alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-2} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-3} & 0 & 0 & 0 & -R_p \cdot A_{PF} & 0 & 0 & \alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-3} & 0 \\ & & & & & & & & +\alpha_{Rad} \cdot A_{PF} \cdot F_{10-2} & & \\ & & & & & & & & +\alpha_{IN} \cdot A_{PF} + R_p \cdot A_{PF} & & \\ 0 & -\alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-2} & -\alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{IN} \cdot A_{PI} \\ & & & & & & & & & & +\alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-2} \\ & & & & & & & & & & +\alpha_{Rad} \cdot A_{PI} \cdot F_{11-3} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -(\alpha_{IN} \cdot [A_{Techo} + A_{Ventana} + A_{Suelo} + A_{PF} + A_{PI}]) \cdot \theta_1 - (1 - \eta_{Ventilación}) \cdot M_{Aire} \cdot C_p \cdot (\theta_1 - \theta_{EXT}) - (\theta_1 - \theta_{1'}) M_{Aire} \cdot C_p \\ (\alpha_{IN} \cdot A_{Suelo}) \cdot \theta_1 + Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot (1 - A_5) \cdot D_2 \cdot A_{Suelo} - A_{Suelo} \cdot \sum_{i=1}^N X_i \cdot \theta_2^{t-i} \\ -A_{Techo} \left(\sum_{i=1}^N X_i \cdot \theta_3^{t-i} - \sum_{i=1}^N Y_i \cdot \theta_9^{t-i} \right) + (\alpha_{IN} \cdot A_{Techo}) \cdot \theta_1 \\ Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot (1 - A_5) \cdot A_{Ventana} + (\alpha_{IN} \cdot A_{Ventana}) \cdot \theta_1 \\ Q_{SOL} \cdot (1 - A_6) \cdot A_5 \cdot A_{Ventana} \\ Q_{SOL} \cdot A_6 \cdot A_{Ventana} + \alpha_{Ou} \cdot A_{Ventana} \cdot \theta_{EXT} \\ Q_{SOL} \cdot A_{PF} + \alpha_{Out} \cdot A_{Ventana} \cdot \theta_{EXT} \\ M_{Aire\ ventana} \cdot C_p \cdot \theta_{EXT} \\ A_{Techo} \left(- \sum_{i=1}^N X_i \cdot \theta_3^{t-i} + \sum_{i=1}^N Y_i \cdot \theta_9^{t-i} + \alpha_{Out} \cdot \theta_{EXT} + Q_{SOL} \right) \\ (\alpha_{IN} \cdot A_{PF}) \cdot \theta_1 \\ (\alpha_{IN} \cdot A_{PI}) \cdot \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} Q_{Aportado} \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \\ \theta_8 \\ \theta_9 \\ \theta_{10} \\ \theta_{11} \end{bmatrix}$$