

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación

Modelo y análisis energético de un sistema
completo de calefacción por suelo radiante
fabricado mediante impresión funcional



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autor: Oihan Urrea Imaz

Directores: Alberto Berrueta Irigoyen
Álvaro Martínez Echeverri

Pamplona, 01/06/2021

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Agradecimientos

A mis tutores Alberto Berrueta Irigoyen y Álvaro Martínez Echeverri, por su disponibilidad y entusiasmo mostrado en todo momento.

A mis padres y hermana, por aguantarme y darme el espacio necesario durante los largos periodos de exámenes.

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Resumen

Debido a la problemática existente en los sistemas convencionales de suelo radiante, sobre todo en renovación de vivienda, el estudio explora el potencial de un suelo radiante eléctrico fabricado con impresión funcional.

Más específicamente, el presente Trabajo Fin de Estudios desarrolla una herramienta mediante el software Matlab-Simulink a través del cual poder llevar a cabo una valoración energética y económica de la vivienda en cuestión.

La herramienta desarrollada consistirá en un modelo que abarque los ámbitos térmico, eléctrico y energético, de manera que sea capaz de simular su comportamiento en las tres áreas de trabajo. La herramienta contará para ello con un modelo de cargas que simule las pérdidas de calor de la vivienda, un modelo eléctrico que conste de un sistema de generación fotovoltaica con los paneles, inversor y almacenamiento y de conexión a la red eléctrica y una serie de bloques que permitan el cálculo de los indicadores adecuados para el análisis energético.

Palabras clave: Calefacción, suelo radiante eléctrico, modelado, Matlab, Simulink.

Abstract

Due to the existing problems with conventional underfloor heating systems, especially in house renovation, this research explores the potential that lies within an electric underfloor heating system based on functional printing.

With the help of the Matlab-Simulink software, this final degree project develops a tool which will allow us to carry out energetic and economic assessments about the house that is being studied.

The developed tool will consist of a model covering thermal, electrical and energy fields, so that it will be able to simulate its behavior in these three areas. For that, the tool will be composed by a thermal model simulating heat loss, an electrical model consisting of a photovoltaic generation system and a grid connection and lastly by a number of blocks that will allow calculation of the most appropriate indicators regarding energy.

Keywords: heating system, electric underfloor heating, modeling, Matlab, Simulink.

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	1
Capítulo 2: Estado del arte	2
Capítulo 3: Proyecto RunHeat.....	5
Capítulo 4: Objeto	8
Capítulo 5: Modelización del sistema	9
5.1. Matlab - Simulink	9
5.2. TILOS.....	10
5.3. Desarrollo del modelo	12
5.3.1. Parte térmica.....	12
5.3.1.1 Fundamentos de transmisión de calor.....	12
5.3.1.2. Descripción y desarrollo del modelo	16
5.3.1.3. Validación del funcionamiento del modelo térmico.....	29
5.3.2. Parte eléctrica	36
5.3.2.1. Introducción	36
5.3.3.2. Modelo	36
5.3.2.3. Resultado.....	44
5.3.3. Análisis económico y energético	44
Capítulo 6: Casos de estudio	47
6.1. Planteamiento.....	47
6.2. Resultados	49
6.3. Conclusiones.....	56
Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras.....	57
Capítulo 8: Referencias	58

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Capítulo 1: Introducción

La energía es el motor por el que se mueven las ciudades. La cada vez mayor densidad de población genera una mayor demanda de electricidad cada vez más complicada de suministrar por los retos tanto técnicos como económicos que ello supone, lo que constantemente lleva a poner en marcha planes de acción que satisfagan todas las necesidades de manera eficiente y sostenible.

Desde finales del siglo XIX y durante todo el siglo XX la generación de energía eléctrica estuvo marcada por una organización económica centralizada que planificara la producción y se encargara del transporte y la distribución, todo ello debido al respaldo tanto desde el ámbito técnico como del económico. Así, no sería hasta finales del siglo XX e inicios del XXI cuando, gracias al gran desarrollo en electrónica de potencia y el comienzo de la utilización de energías renovables, el sistema comenzara a desarrollarse en la dirección en la que hoy se conoce. Partiendo de este nuevo sistema en el que centrales de generación eléctrica convencional y renovable conviven, diferentes factores han impulsado una nueva remodelación del sistema eléctrico, como un aumento anual en la demanda que provoca la saturación del sistema, cambios normativos que incentivan la competencia en el sector y sobre todo la concienciación de la sociedad y las restricciones medioambientales que dificultan el desarrollo de la red eléctrica con nuevas centrales y líneas de transporte necesarias.

Estas necesidades han traído consigo un cambio necesario en el modelo energético. La transición hacia un modelo renovable, su aptitud para generar en ubicaciones cercanas al consumidor de manera independiente y su madurez y competitividad han desembocado en un sistema cada vez menos centralizado y más distribuido en el que los consumidores pueden hacer las veces de generadores y por tanto convirtiéndose en un sistema bidireccional.

Ante esta situación existe una idea que cobra una gran importancia: El acoplamiento sectorial. Es un elemento fundamental en la actual transición ecológica, pues propone un aumento en la electrificación de distintos sectores por medio de recursos renovables como pueden ser la automoción, muy extendida, o la calefacción, que a diferencia de la refrigeración está muy poco vinculada al sector eléctrico pero que podría cambiar con el desarrollo de los suelos radiantes eléctricos, un campo muy poco desarrollado y con gran margen de mejora y potencial utilidad tanto en edificios convencionales como en las nuevas passive house.

Capítulo 2: Estado del arte

Los sistemas de calefacción por suelo radiante son una cada vez más competitiva alternativa al sistema de calefacción centralizado o por radiadores tradicional, y pese a que esta última opción sigue siendo la más utilizada en viviendas y locales, son cada vez más las instalaciones en las que se opta por esta más novedosa y cada vez más asentada opción en el mercado energético: Desde viviendas unifamiliares o edificios de viviendas hasta hospitales, oficinas o centros deportivos.

El suelo radiante es un sistema de calefacción que funciona gracias a la canalización de una fuente de calor debajo del suelo [1]. En otras palabras, es un sistema que emana calor de forma homogénea bajo el pavimento de una vivienda. A pesar de suponer una elevada inversión inicial en comparación a los sistemas convencionales, los beneficios que aporta y su eficiencia y rendimiento lo convierten en uno de los mejores sistemas de hoy en día. Dichas instalaciones aumentan la temperatura del suelo logrando calentar toda la vivienda, proceso capaz de ser llevado a cabo sin superar los 50°C [2] y por tanto considerado sistema de calefacción a baja temperatura.

Entre las principales ventajas de los suelos radiantes [2] respecto a los radiadores convencionales destacan:

1. **Elevado rendimiento:** La cantidad de energía necesaria para calentar es muy baja debido a la temperatura de operación del sistema, que ronda los 30-45°C frente a los 80-85°C que los sistemas clásicos que trabajan con agua necesitan. Además, este rendimiento es mejorado con la combinación con energías renovables.
2. **Aprovechamiento del espacio:** Al ser un sistema instalado bajo el pavimento, deja de ocupar espacio útil que puede ser utilizado para el mobiliario.
3. **Zonificación [1]:** Al contrario que los radiadores, el suelo radiante divide en zonas la superficie a calentar, pudiendo controlar de manera individual aquellas que se desean calentar y volviendo al sistema más eficiente.
4. **Confort:** A diferencia de los radiadores que únicamente calientan zonas puntuales, el calor generado por sistemas de suelo radiante resulta uniforme tanto a lo largo de toda la superficie como de abajo arriba, favoreciendo la sensación de comodidad.

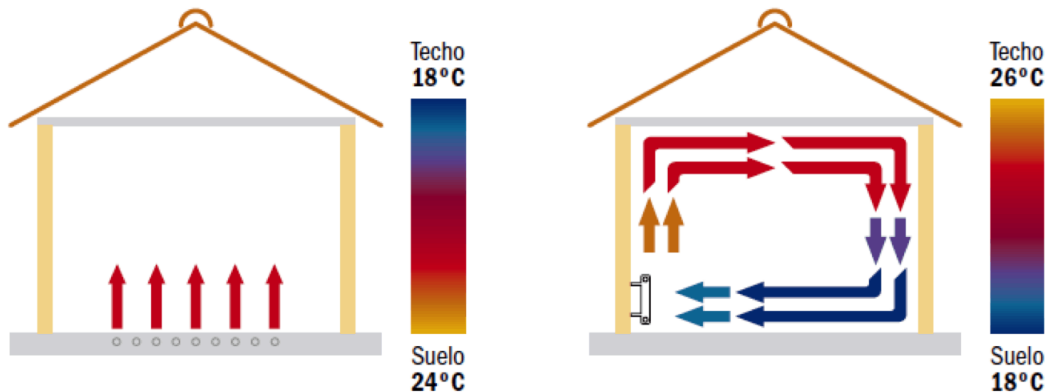


Figura 1: Movimiento del aire en sistemas de calefacción por suelo radiante frente a radiador

Suelo radiante eléctrico

Se trata de un sistema de calefacción que, a diferencia del suelo radiante tradicional, cuyo funcionamiento está basado en tuberías de agua, funciona con suministro eléctrico. Para ello el suelo cuenta con un cable conductor distribuido por todo su interior.

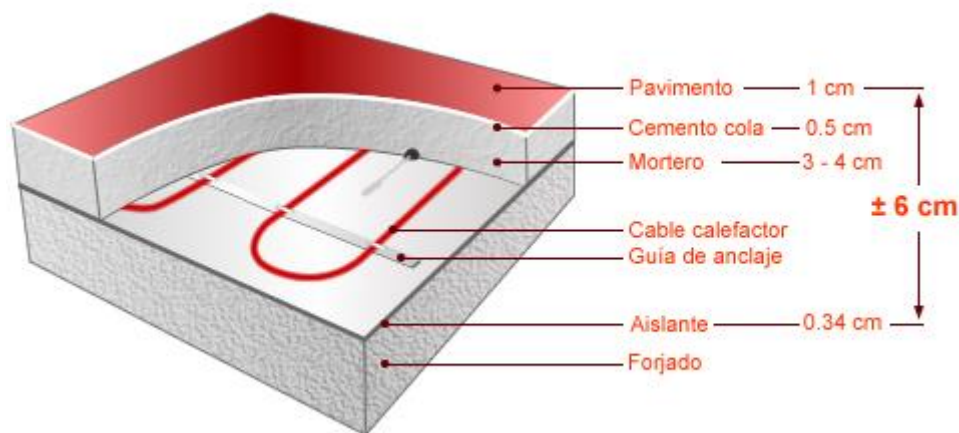


Figura 2: Composición por capas de un suelo radiante eléctrico

A continuación, se muestran algunos de los principales puntos a favor de los suelos radiantes eléctricos respecto a los de agua.

1. **Eliminación de fluidos [2]:** Se evita todo tipo de problema proveniente de ello como pueden ser filtraciones o fugas que requieran mantenimiento.
2. **Mayor simplicidad/sencillez:** El mantenimiento requerido por el sistema es casi nulo al no contar este con ningún tipo de pieza móvil ni con elementos necesarios en los suelos radiantes de agua como la caldera, el depósito o las tuberías.

- Inercia del sistema:** El tiempo necesario para el calentamiento es una de las mayores diferencias entre ambos. Mientras que la calefacción de suelo radiante eléctrica permite alcanzar la temperatura deseada en la habitación tras pocos minutos, los suelos radiantes con agua pueden tardar horas en calentar un espacio desde cero, no adaptándose bien a grandes cambios de temperatura.
- Instalación [1]:** Es una de las principales ventajas de los sistemas eléctricos con respecto de los de agua, ya que en estos últimos es necesario el levantamiento de todo el pavimento para la inserción del sistema de tubería, lo que vuelve la instalación más compleja, económicamente costosa y lenta.

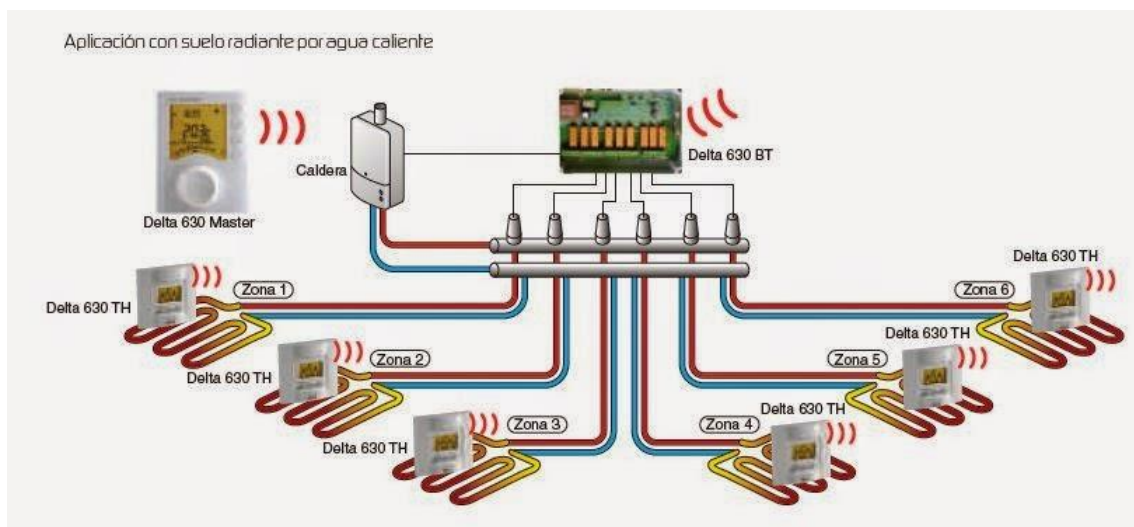


Figura 3: Sistema de suelo radiante por agua

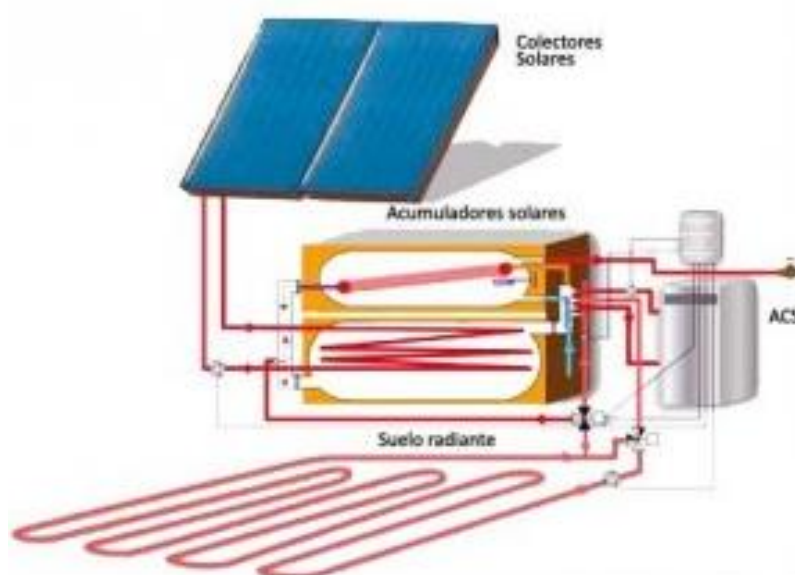


Figura 4: Sistema de suelo radiante eléctrico con colectores solares

Capítulo 3: Proyecto RunHeat

A pesar de las ventajas mencionadas, pueden darse casos donde la implementación de los sistemas de suelo eléctrico no sea posible debido a la complejidad que supone llevar a cabo la instalación. Ante esta problemática, el proyecto RunHeat [2], proyecto desarrollado por el centro tecnológico NAITEC en Navarra en colaboración con la Universidad Pública de Navarra, propone “conferir a un elemento tan habitual como el suelo laminado propiedades eléctricas conductoras”. Ello facilitaría en gran medida la implementación de suelos radiantes eléctricos, reduciendo de manera notable el precio de la ejecución de la obra y centrando la atención en una buena adaptación del sistema generador al circuito por el que circule la corriente.

Con la finalidad de dotar el suelo laminado con propiedades eléctricas, el proyecto RunHeat propone la implementación de un circuito eléctrico de unas pocas micras de espesor en la cara interna del laminado, empleando para ello tintas PTC (Positive Temperature Coefficient).

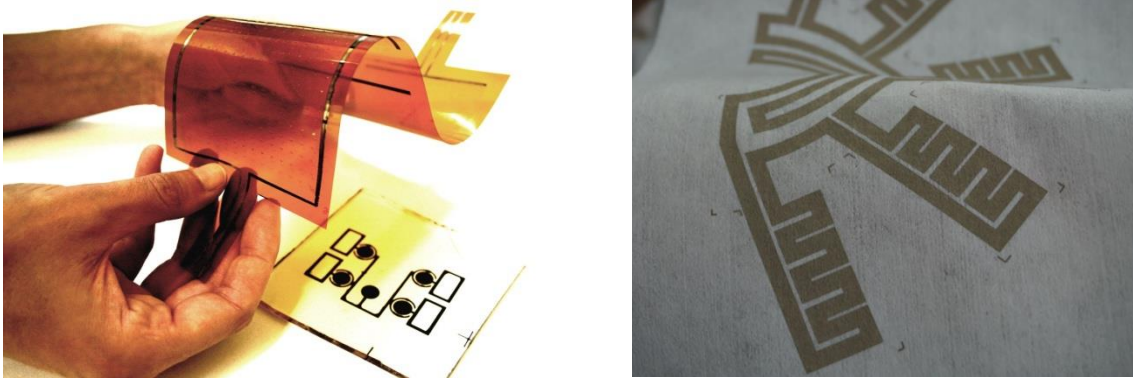


Figura 5: Distintas tintas PTC desarrolladas por NAITEC

Ante el largo y laborioso proceso que suponen los métodos de fabricación convencionales no imprimibles como pueden ser la fotolitografía o las técnicas PVD y CVD (physical vapour deposition y chemical vapour deposition respectivamente), y su dificultad de implementación, se apuesta por “la fabricación por impresión de producto electrónico de altas prestaciones y bajo coste” como alternativa [2].

A continuación se muestran algunos de ellos:

- **Inkjet:** Es una técnica de impresión aditiva sin contacto donde la imagen se forma mediante la deposición de pequeñas gotas que salen de los inyectores de un cabezal.

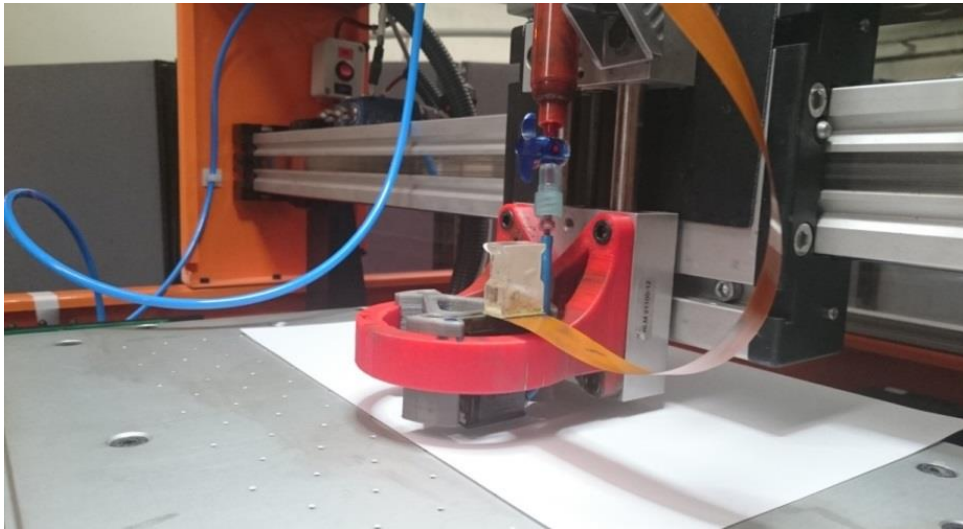


Figura 6: Proceso de impresión Inkjet. NAITEC

- **Serigrafía:** Es una técnica de impresión aditiva con contacto donde la imagen se genera a través de una pantalla que contiene el diseño. La tinta se deposita a través de esa pantalla con la ayuda de un racle sobre el sustrato.

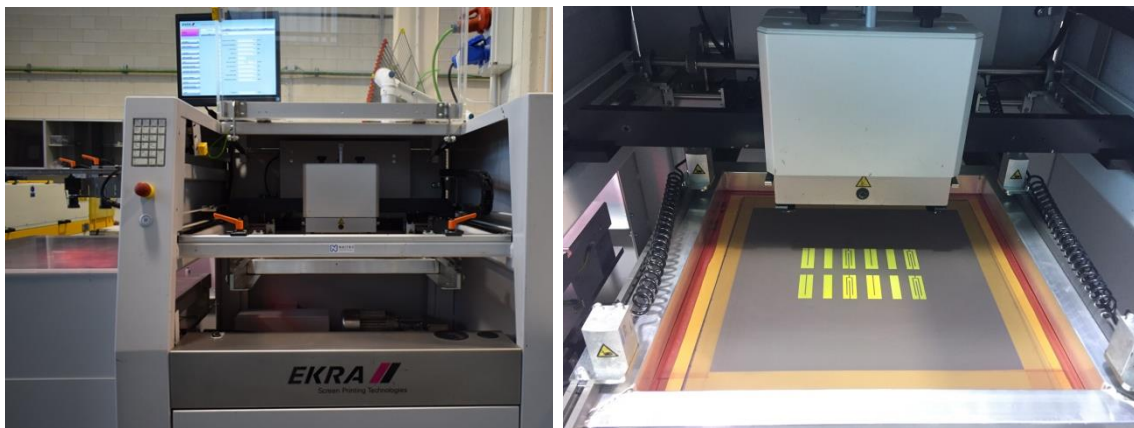


Figura 7: Máquina de serigrafía y malla de impresión. NAITEC

- **Offset:** Es una técnica de impresión aditiva con contacto e indirecta. Consiste en un sistema de rodillos por los cuales la tinta se va transfiriendo hasta una plancha que contiene el diseño; la tinta se adhiere a las zonas que contienen el diseño y se transfiere a un rodillo de caucho que es el que lo transmite al sustrato. Esta técnica es válida para sustratos muy flexibles como papel.

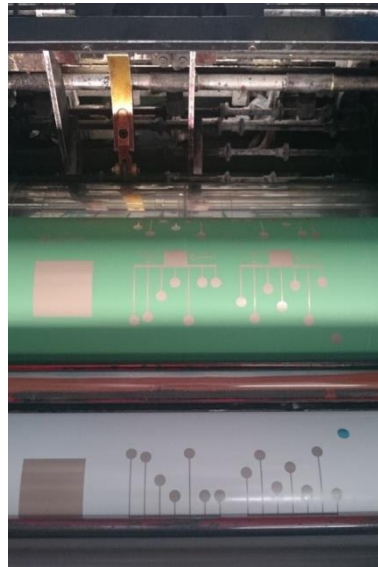


Figura 8: Impresión por offset. NAITEC

- **Otros: Huecograbado y flexografía:** La flexografía es una técnica de impresión de alta velocidad que utiliza una placa flexible con relieve. Las zonas impresas de la forma están realizadas respecto de las zonas no impresas. El huecograbado es un sistema de impresión rotativo en el que los cilindros recogen y transmiten la tinta. Mediante presión, imprime directamente al soporte plástico.

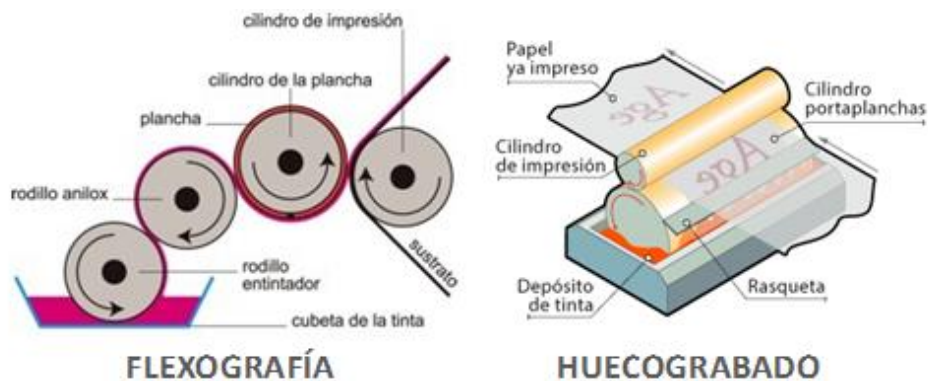


Figura 9: Esquema de impresión por flexografía y huecograbado

Estas técnicas se aplican para obtener productos como antenas o teclados y, aunque la definición no es tan buena como en microelectrónica, se puede aumentar mucho la superficie de trabajo, siendo la electrónica impresa de gran superficie (OLAE) uno de los campos con mayor potencial actual. Estas técnicas permiten gran flexibilidad, facilidad de integración, capacidad para adaptarse a entornos muy diferentes a un menor coste y con escalabilidad en grandes formatos.

Capítulo 4: Objeto

Ante un sector en auge y con gran recorrido por delante, el presente proyecto tiene como finalidad, en última instancia, el diseño de un sistema de calefacción por suelo radiante eléctrico fabricado mediante impresión funcional.

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es la realización de un modelo mediante el entorno software MATLAB capaz de simular el comportamiento de un sistema completo de calefacción por suelo radiante, así como de su sistema de generación, almacenamiento y de su conexión a red.

Este objetivo general se aborda mediante los siguientes objetivos específicos:

- Modelado de cargas térmicas en estado transitorio que represente el comportamiento real aproximado de las pérdidas que se dan en una vivienda a lo largo de un año.
- Modelado eléctrico de una instalación de autoconsumo fotovoltaico con almacenamiento y conectada a la red eléctrica, así como su dimensionado para poder suministrar con electricidad el consumo total de una vivienda.
- Estudio energético de diferentes situaciones con las que corroborar su correcto funcionamiento.

Capítulo 5: Modelización del sistema

5.1. Matlab - Simulink

Matlab es un software matemático que ofrece al usuario un entorno de desarrollo integrado y que cuenta con un potente lenguaje de programación. Es un programa ampliamente utilizado en el ámbito de la ingeniería debido a la gran variedad de aplicaciones disponibles, desde análisis de datos a desarrollo de algoritmos o cálculo paralelo.

Una de las herramientas disponibles en dicho software es Simulink. Se trata de una toolbox que sirve para el diseño y simulación de sistemas dinámicos que pueden ser o no lineales, en tiempo continuo o discreto, sistemas híbridos... Es un entorno de desarrollo de modelos que son construidos por medio de la librería de bloques de la que dispone y gracias a la cual pueden modelizarse en diferentes dominios.

Es por ello que se ha decidido llevar a cabo la modelización del sistema en este entorno. Como principal razón se encuentra la gran cantidad de bloques disponibles: Como se muestra a continuación en la figura 10, Simulink dispone de una gran variedad de librerías de bloques en muy distintos ámbitos, muy útiles a la hora de combinar diferentes sistemas como señales lógicas e instalaciones eléctricas o térmicas.

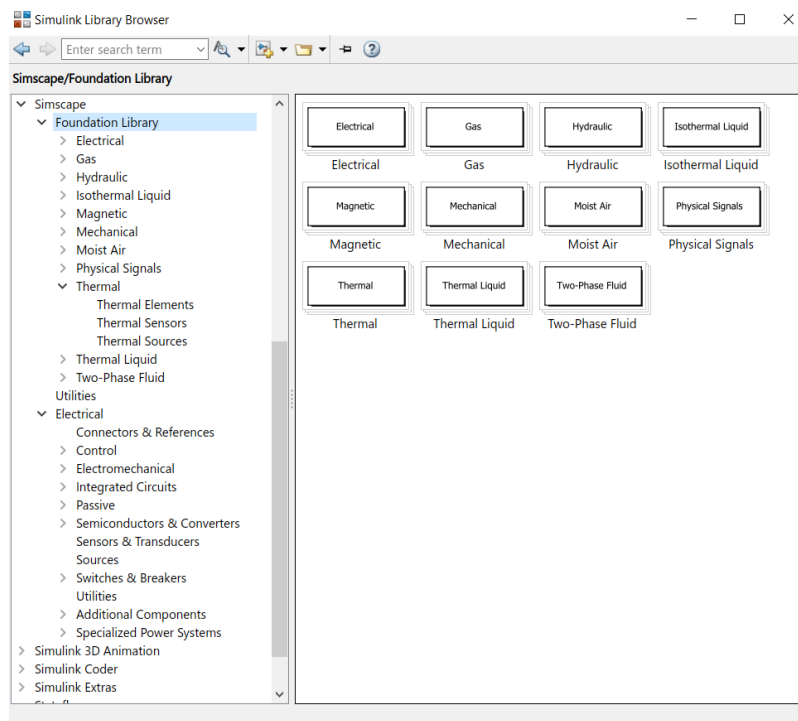


Figura 10: Menú de librerías disponibles en Simulink

Ello, sumado al hecho de poder diseñar un modelo de una manera más visible y entendible en vez de mediante código y a tratar de ver cómo trabaja una herramienta como esta y ver si en futuro serviría para estudios de parecida índole ha llevado a tomar dicha decisión.

5.2. TILOS

TILOS es una herramienta desarrollada en el entorno Simulink en la que se encuentran los diferentes elementos necesarios para la consecución de un modelo de un sistema que podrá ser tanto de generación como de consumo eléctricos, modelados de manera suficientemente próxima a la realidad.

A continuación se muestra su interfaz de inicio

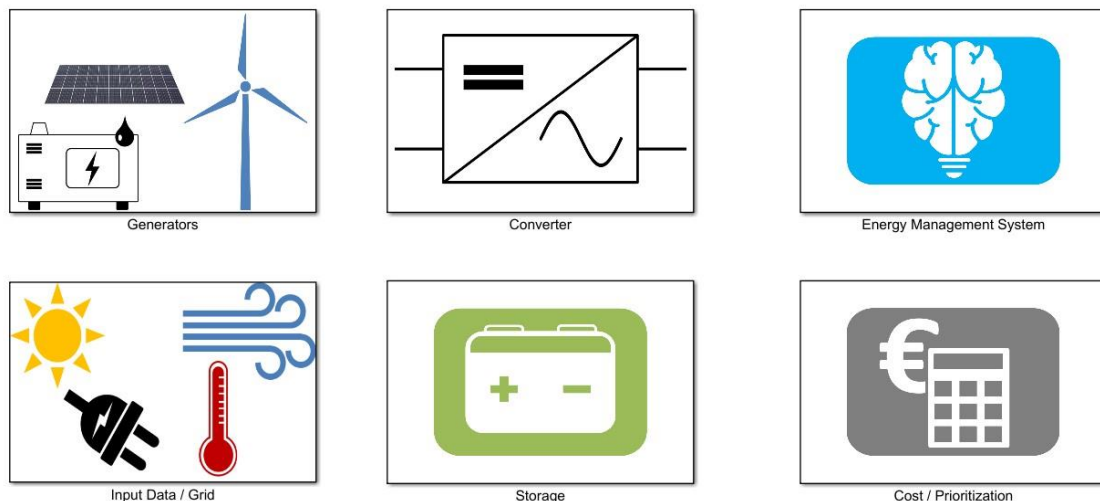


Figura 11: Interfaz de la herramienta TILOS

Tal y como muestra la figura 11, la herramienta está compuesta por seis grandes bloques: Entre los aspectos más técnicos del montaje, en primer lugar se encuentran los generadores, donde puede escogerse entre uno diésel, fotovoltaico o eólico tal y como se muestra en la figura 12

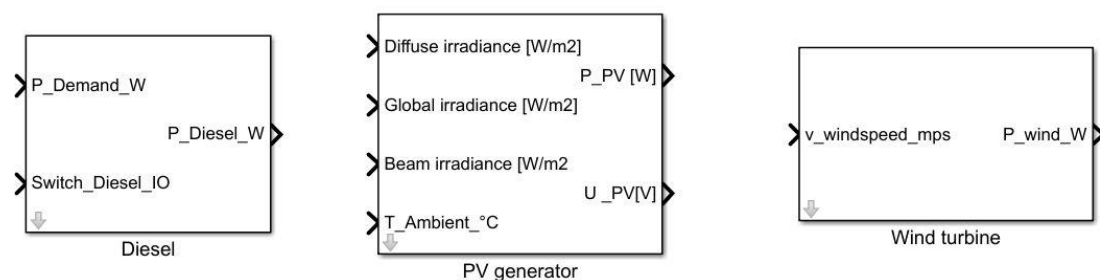


Figura 12: Generadores disponibles en TILOS

En segundo lugar se tiene un convertidor inversor con el que poder llevar a cabo el paso de corriente continua a corriente alterna en caso de que fuera necesario. Como último bloque de la parte más constructiva del sistema aparece el almacenamiento, dentro del cual se dispone de una gran variedad de baterías dependiendo de su química y de las que no se hará uso en este diseño.

En lo referido al recurso, el programa dispone de diferentes opciones entre las que escoger dependiendo del sistema que pretende modelarse.

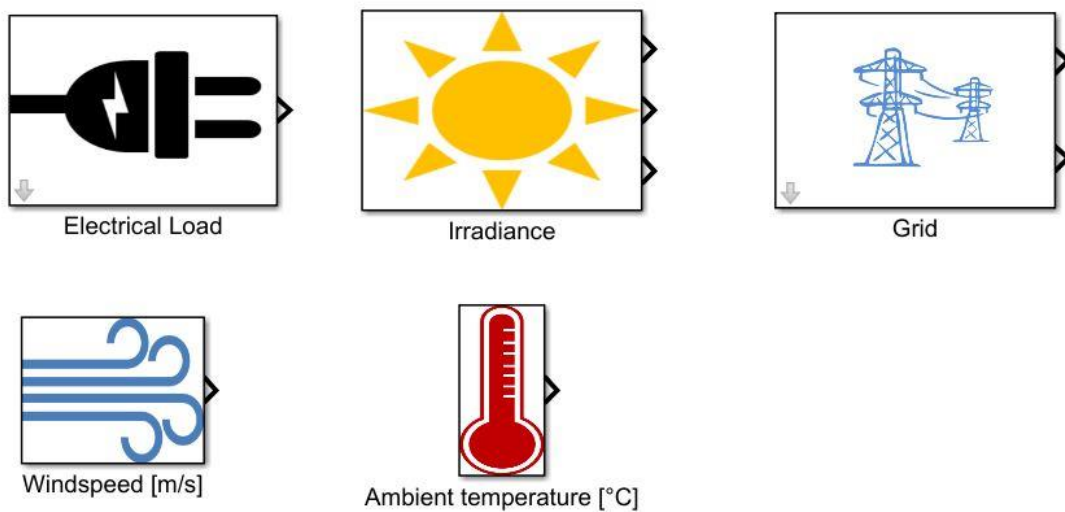


Figura 13: Inputs disponibles. TILOS

La figura 15 muestra por un lado los *inputs* de recurso natural de sol, viento y temperatura a partir de los cuales hacer funcionar los generadores anteriormente mencionados, mientras que por otro lado también ofrece la posibilidad de llevar a cabo conexiones con un modelo de red eléctrica o cargas.

Por último, se cuenta con dos bloques de aspecto económico y de gestión de red con los que llevar a cabo análisis financieros.

De todos ellos, únicamente dos bloques serán utilizados para el modelo y estudio planteado en este TFG: El generador fotovoltaico y su correspondiente convertidor, de los que se hablará más adelante de manera más detallada.

5.3. Desarrollo del modelo

A continuación se llevará a cabo la descripción, análisis y justificación del modelo desarrollado como objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado, que irá dividido en tres partes:

- Un modelo térmico capaz de simular las pérdidas de calor en una vivienda.
- Un modelo eléctrico que simule el comportamiento de un sistema de autoconsumo con almacenamiento y conexión a red.
- Adaptación necesaria para la realización de un balance tanto energético como económico del sistema.

5.3.1. Parte térmica

5.3.1.1 Fundamentos de transmisión de calor

El calor es una forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en sus temperaturas [3], proceso que puede ser llevado a cabo por tres mecanismos distintos: Conducción, convección y radiación.

Conducción

Es un proceso de transferencia de calor que va de las partículas más energéticas a las menos, o más sencillamente, del cuerpo con mayor temperatura al de menor. Se trata de un proceso que requiere un medio material por el que poder moverse, y la propiedad que determina la capacidad de este para conducir el calor es la conductividad térmica.

La expresión general del campo de temperaturas viene dada por la ecuación de Fourier

$$\rho \cdot c_p \frac{\delta T}{\delta t} = k \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) + \dot{g}$$

Ecuación 1

en donde:

ρ : es la densidad del cuerpo [kg/m³]

c_p : Calor específico del cuerpo [J/kg °C]

k : conductividad térmica [W/m°C]

\dot{g} : calor generado por unidad de volumen [W/m³]

Para el caso de conducción de calor en paredes planas la ley de Fourier de la conducción puede expresarse como

$$\dot{Q}_{cond} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond}} \quad (\text{W})$$

Ecuación 2

donde

$$R_{cond} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (^\circ\text{C}/\text{W})$$

Ecuación 3

se denomina resistencia térmica de la pared o resistencia de conducción.

L : espesor de la pared

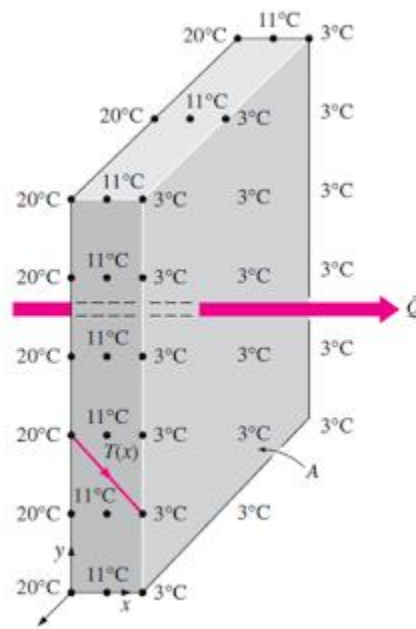


Figura 14: Conducción térmica a través de pared

Por tanto, se concluye que la potencia calorífica transmitida para el caso del estudio que se plantea será mayor cuanto mayor sea la diferencia entre ambos focos y menor la resistencia de conducción, siendo tanto la conductividad térmica del material como la superficie inversamente proporcionales a esta.

Convección

Se trata de un proceso de transferencia de calor entre una superficie sólida y una fluida, de modo que el calor sea transmitido del cuerpo con mayor temperatura al de menor. De esta manera, el fluido más cercano a la superficie absorbe dicha energía, ve reducida su densidad y provoca el movimiento entre partículas, dejando su lugar a otras con menor temperatura. Dependiendo de la manera en la que el movimiento de las partículas es llevado a cabo se

distinguen la convección forzada y la convección natural, siendo este segundo caso el que atañe al estudio realizado.

Partiendo de la ley de Newton de enfriamiento [3], la ecuación para la convección queda convenientemente expresada como

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (W)$$

Ecuación 4

donde

h : coeficiente de convección [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]

T_s : Temperatura superficial del cuerpo sólido [$^\circ C$]

T_∞ : Temperatura del fluido suficientemente alejada de la superficie de contacto [$^\circ C$]

Del mismo modo que con la conducción, la expresión de la convección puede reescribirse como

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{conv}} \quad (W)$$

Ecuación 5

donde

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A_s} \quad (^\circ C/W)$$

Ecuación 6

es la resistencia de convección.

A pesar de la complejidad que puede suponer la convección, se observa que su estructura sigue una similar a la de la conducción, siendo mayor la transferencia de calor cuanto mayor es la diferencia entre temperaturas y menor la resistencia de convección, quien a su vez depende del coeficiente convectivo h . A diferencia de la conductividad térmica k , este no es propiedad del fluido, "sino un parámetro que debe obtenerse de forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la geometría de la superficie, el movimiento del fluido, las propiedades de este o su velocidad" [3].

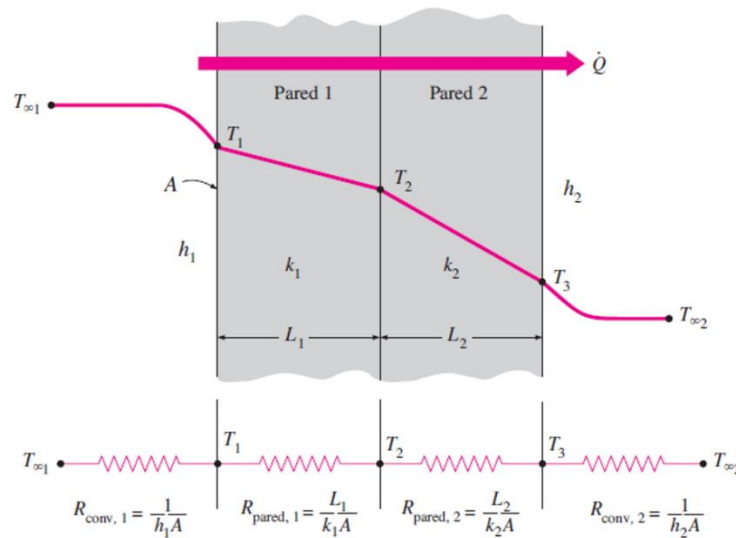


Figura 15: Transmisión de calor a través de pared. Resistencias de conducción y convección

Radiación

Es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas llevada a cabo por la materia. A diferencia de los dos métodos anteriores, este no requiere ningún medio material por el que desplazarse, y es la manera en la que llega a nuestro planeta la energía proveniente del sol. Es un fenómeno de transmisión de calor que todo cuerpo produce por el hecho de estar a una temperatura superior a 0 K.

La potencia máxima de radiación emitida desde una superficie real a una temperatura T_s se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann como

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (\text{W})$$

Ecuación 7

Donde

T_s : temperatura superficial del cuerpo emisor [K]

ε : emisividad de la superficie cuyo valor va entre cero y uno

σ : es la constante de Stefan-Boltzmann y vale $5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \text{ K}^4\text{]}$

Estas pérdidas no serán consideradas durante el desarrollo del presente TFG puesto que no se tendrán en cuenta ni la radiación solar incidente sobre la fachada ni el intercambio radiante entre componentes del edificio, despreciables por estar a bajas temperaturas.

5.3.1.2. Descripción y desarrollo del modelo

El apartado térmico tiene como objetivo simular de una manera aproximada el comportamiento que los distintos elementos constructivos que forman una vivienda adquieren a lo largo de todo un año. Situado este estudio en un ámbito favorable a la generación distribuida de energía mediante recurso renovable y al autoconsumo, se ha partido del Documento Básico (DB) del Código Técnico de Edificación (CTE) referente al ahorro de energía [4] así como del Documento Reconocido para la certificación de eficiencia energética [5] a la eficiencia energética, con los que poder realizar un modelo de cargas en dicho ámbito y llevar a cabo todo el estudio hacia la que es su finalidad: La simulación y discusión de una posible alternativa de autoconsumo tanto térmico como eléctrico.

En lo que al modelo en sí se refiere, este constará de únicamente dos habitaciones separadas por una partición interior simplificando así las simulaciones y cálculos. Dado el propósito de este estudio inicial se han llevado a cabo las siguientes consideraciones previas:

- Teniéndose en cuenta la implementación del sistema de calefacción objeto de estudio, se considerará suficientemente aislado tanto el suelo por debajo del conductor generador como el techo, también aislado al ser el suelo de la próxima altura habitable y por tanto siendo solamente posible su propagación por los laterales.
- Toda superficie lateral no compuesta por pared, denominados hueco, será modelado de acuerdo con el documento básico DB-HE Ahorro de energía [4] y eficiencia energética [5], y dependerá por tanto de su transmitancia térmica y la zona climática durante el invierno.
- Debido a su potencial eficiencia energética y la posibilidad de dirigir el modelo hacia un punto de vista passive house, la simulación será llevada a cabo sin tener en cuenta puentes térmicos los cuales consisten en puntos o zonas de la fachada a través de los que la transmisión de calor se lleva a cabo con mayor facilidad y que se dan en los materiales más conductores del edificio.
- Tanto los materiales como los espesores utilizados para modelizar las paredes han sido obtenidos del edificio de referencia señalado en [5].

Su diseño se ha realizado apoyado en la analogía existente entre los circuitos térmico y eléctrico, volviéndose así un sistema mucho más comprensible y fácil de manejar, como puede verse en la figura 16 de a continuación.

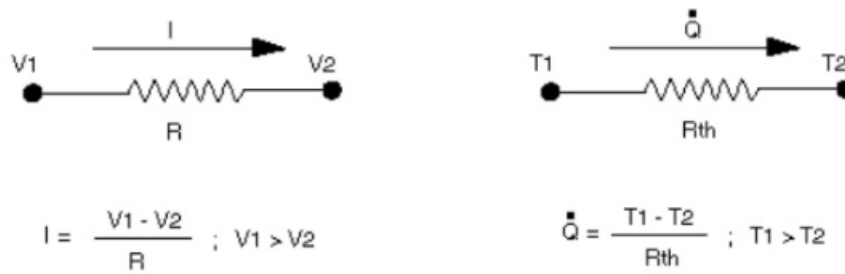


Figura 16: Analogía entre los campos eléctrico y térmico

Dada dicha relación, se lleva a cabo la comparación entre la ecuación que describe el comportamiento de un condensador (ecuación 8) y la obtenida a partir del primer principio de la termodinámica (ecuación 9) aplicada a un sólido [3], ambas en su forma diferencial

$$i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

Ecuación 8

$$Q(t) = m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt}$$

Ecuación 9

a partir de las cuales se obtienen

$$v(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i(t) dt$$

Ecuación 10

$$T(t) = \frac{1}{m C_p} \cdot \int_0^t Q(t) \cdot dt$$

Ecuación 11

donde

C: es la capacidad del condensador [F]

I: es la corriente eléctrica que circula por él [A]

V: tensión en bornes del condensador [V]

y

m: es la masa del sólido [kg]

C_p : es el calor específico del sólido [J/kg °C]

\dot{Q} : Potencia calorífica [W]

Tal y como muestran las ecuaciones 10 y 11 existe una similitud entre ambas, de manera que

$$m \cdot C_p = C$$

Ecuación 12

$$v(t) = T(t)$$

Ecuación 13

$$i(t) = \dot{Q}(t)$$

Ecuación 14

Dicha analogía, integrada en el tiempo, permite llevar a cabo el diseño de cargas térmicas y simular su comportamiento a lo largo de todo un año en un ámbito eléctrico más ampliamente conocido.

Como resultado, se obtiene un modelo compuesto por un lado de resistencias eléctricas encargadas de simular las pérdidas tanto de conducción como de convección tal y como muestran las ecuaciones 3 y 6 y por otro lado de capacidades que modelen la variación del flujo de calor en estado transitorio. Ambos elementos irán modelados de forma distribuida, lo que resultará en una distribución en capas de las paredes y huecos y la mayor precisión que ello supone a la hora de realizar simulaciones de flujos en paredes multicapa formadas por materiales con distinta finalidad y por tanto distintas características.

Además de la distribución de cargas para modelar las paredes, el modelo térmico deberá también disponer de un control que permita el paso o no de la potencia definida por el usuario, así como de las pérdidas que ocurren debidas a las renovaciones de aire y las ocurridas a través de los huecos. Así, a continuación se describe el desarrollo de cada una de las partes que compone este modelo.

Control del suministro

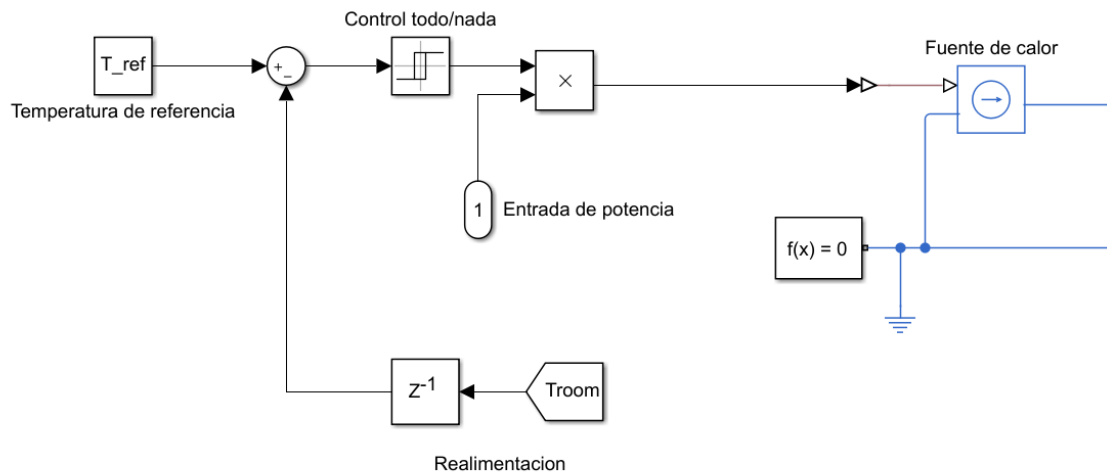


Figura 17: Modelo del control de suministro de potencia. Simulink

Se trata del bloque encargado de modelar la entrada de calor en el sistema de manera controlada y del que partirán los diferentes flujos de calor como se verá más adelante.

Como muestra la figura 17, el modelo comienza con una temperatura de referencia T_{ref} definida por el usuario y que es comparada con la temperatura de la habitación T_{room} mediante realimentación. El bloque entre ambos, Z^{-1} , es utilizado para llevar a cabo la acción un cierto tiempo de paso después y conseguir un adecuado funcionamiento del sistema. La diferencia entre ambas temperaturas es llevada a un control por histéresis, que es quien llevará a cabo el control del flujo entrante. El funcionamiento de este consiste en el suministro o no de potencia dependiendo del rango de temperatura en el que se encuentre la habitación, siendo este un rango que el usuario podrá definir a voluntad propia gracias a la capacidad de este tipo de calefacción en contraposición a los sistemas con agua. En último lugar se realiza la conversión de la señal de entrada en una eléctrica obteniendo, tal y como ha sido explicado anteriormente, una fuente de calor.

Para una mayor comprensión de su funcionamiento, se muestra a continuación una simulación de este.

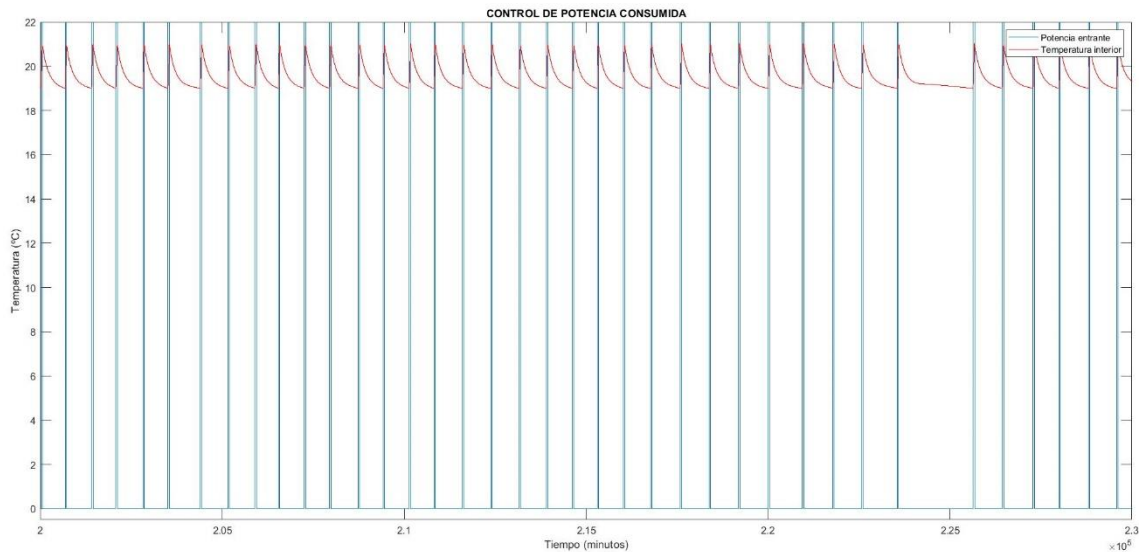


Figura 18: Control del consumo de potencia. Simulink

La imagen muestra de manera clara como potencia no nula es consumida cada vez que la temperatura interior sobrepasa los límites establecidos. En este caso, se consume potencia cuando la temperatura se encuentra por debajo de 19°C, y lo hace hasta los 21°C, límite impuesto por el control de histéresis. Una vez llegados a la temperatura fijada, esta evoluciona de forma natural hasta volver a los 19°C y repetir el proceso.

Paredes exteriores

Se trata de un modelo sencillo de pared en contacto con el exterior y compuesta por resistencias con las que simular las pérdidas de conducción y convección y por capacidades que simulen la velocidad de variación de temperaturas en el tiempo, como muestra la siguiente imagen.

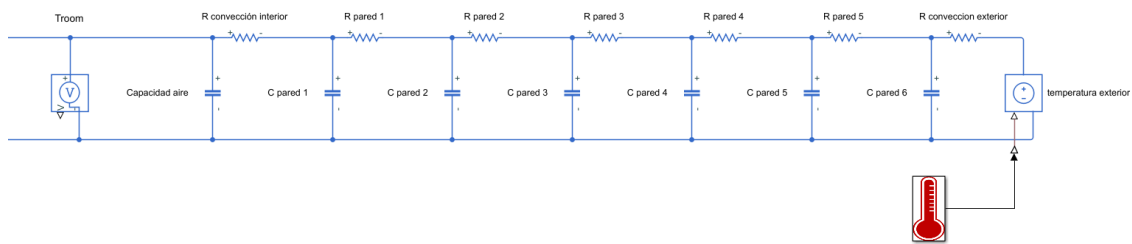


Figura 19: Modelo de una pared exterior. Simulink

La imagen muestra, además de las resistencias y capacidades, un voltímetro (que por analogía representa un sensor de temperatura) representativo de la temperatura interior de la habitación en su lado izquierdo, cuyo valor caerá a medida que se acerca al exterior de la vivienda simulada en la parte derecha del modelo mediante una fuente de tensión equivalente a una temperatura y los datos de temperatura minutas utilizados en el estudio.

Para el aproximado funcionamiento de las paredes a la realidad, estas han sido diseñadas de acuerdo con el edificio de referencia definido en [5] tanto en los materiales utilizados como en sus espesores, presentados de la capa exterior a la interior en la siguiente tabla:

Material	L (mm)	K (W/m °C)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/kg °C)
Mortero de cemento	15	1,3	1900	1000
Ladrillo perforado	115	0,5	900	1000
Aislante	30	0,035	50	1675
Ladrillo hueco	40	0,4	920	1000
Enlucido de yeso	15	0,57	1100	1000

Tabla 1: Propiedades de materiales utilizados en pared exterior

A partir de dichos valores, el área de pared definido por el usuario (24,25 m² para este caso) y las fórmulas para resistencias de conducción (ecuación 3), convección (ecuación 6) y capacidad (ecuación 12) se obtienen los valores de resistencia y capacidad introducidos en el modelo mostrado

Nombre	Valor (°C/W)	Nombre	Valor (J/°C)
R convección int	0,0027	Capacidad aire	4,8813e+04
R pared 1	4,7581e-4	C pared 1	3,4556e+05
R pared 2	0,0095	C pared 2	1,6005e+06
R pared 3	0,0353	C pared 3	1,2854e+06
R pared 4	0,0041	C pared 4	4,7666e+05
R pared 5	0,0011	C pared 5	6,4626e+05
R convección ext	0,0027	C pared 6	2,0006e+05

Tabla 2: Resistencia y capacidad de los materiales para pared exterior

Definidos los parámetros necesarios, el comportamiento de la pared se muestra en la siguiente gráfica, donde se muestra la temperatura de diferentes secciones a lo largo de su espesor

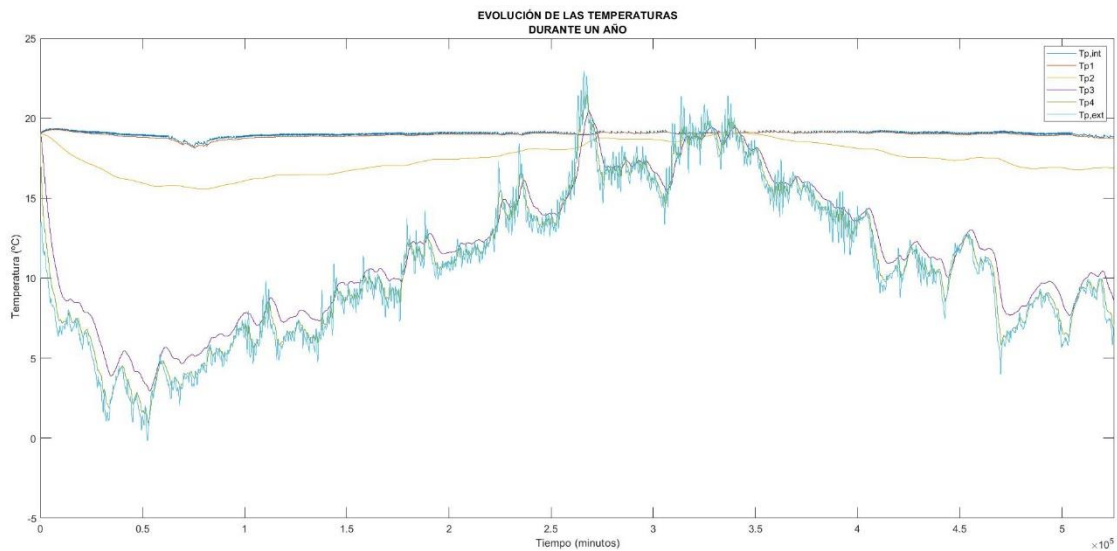


Figura 20: Evolución de la temperatura de las distintas capas de la pared exterior. Simulink

Como se ha dicho antes, se observa una disminución de la temperatura cuanto más próxima se encuentra la sección al exterior. También destaca el amortiguamiento proporcionado por los distintos materiales, principalmente por el aislante, quien debido a su baja conductividad térmica logra que el flujo de calor saliente sea mínimo y que la temperatura se mantenga lo más elevada posible.

Huecos

Se define como huecos a cualquier elemento transparente o semitransparente de la envolvente térmica del edificio. Comprende las ventanas, lucernarios así como las puertas acristaladas con una superficie semitransparente superior al 50% y son definidos a través de su transmitancia térmica α [$W/m^2\text{°C}$] equivalente al coeficiente de convección h , dependiente de la zona climática en la que se ubica y del porcentaje de huecos en la vivienda [4] [5].

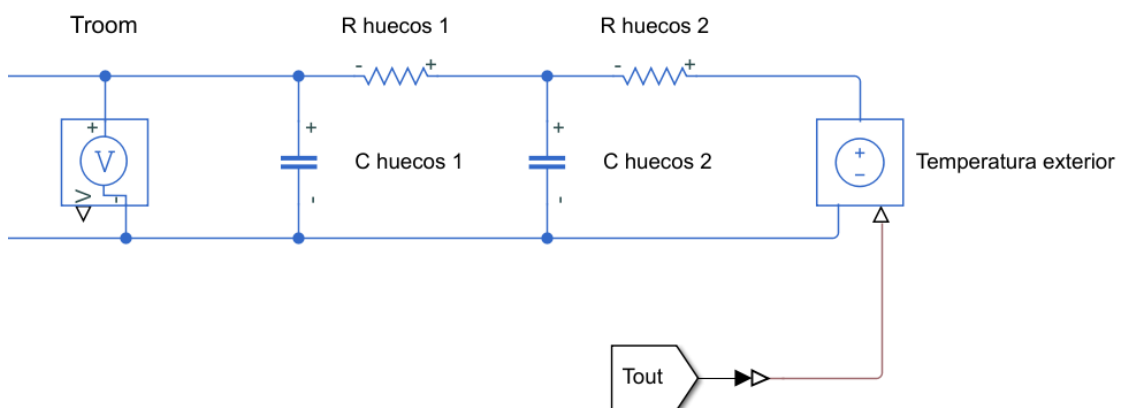


Figura 21: Modelo de huecos de una vivienda. Simulink

Al igual que con la pared exterior, los huecos también parten de la temperatura interior *Troom* y quedando dividido en este caso en dos secciones cuyas temperaturas se analizarán después. En la parte derecha cuenta también con la fuente de tensión que modela la temperatura exterior.

Para la obtención de los valores de R y C, se ha partido de los valores de transmitancia térmica de huecos para el edificio de referencia en [5] y cuyos valores dependen de la zona climática disponible en el Documento Básico [4].

En el caso de Iruña, cuya altitud es de 449 m y por tanto zona climática D, se obtienen los siguientes posibles valores

% de huecos	D			E		
	N/NE/NO	E/O	S/SE/SO	N/NE/NO	E/O	S/SE/SO
de 0 a 10	3,5	3,5	3,5	3,1	3,1	3,1
de 11 a 20	3,0	3,5	3,5	3,1	3,1	3,1
de 21 a 30	2,5	2,9	3,5	2,6	3,0	3,1
de 31 a 40	2,2	2,6	3,4	2,2	2,7	3,1
de 41 a 50	2,1	2,5	3,2	2,0	2,4	3,1
de 51 a 60	1,9	2,3	3,0	1,9	2,3	3,0

Figura 22: Valores para los huecos en función del porcentaje. Documento Básico HE

Para el caso de estudio, donde los huecos representan el 11,25% del área y sin tener en consideración la orientación de estos, se utilizará un valor intermedio $\alpha = 3,2$. Los valores obtenidos con las ecuaciones 6 y 12 son

Nombre	Valor (Ω)	Nombre	Valor (F)
R huecos 1	0,0694	C huecos 1	8,7638e+04
R huecos 2	0,0694	C huecos 2	8,7638e+04

Tabla 3: Resistencia y capacidad para modelización de huecos

y su comportamiento a lo largo del año es el siguiente

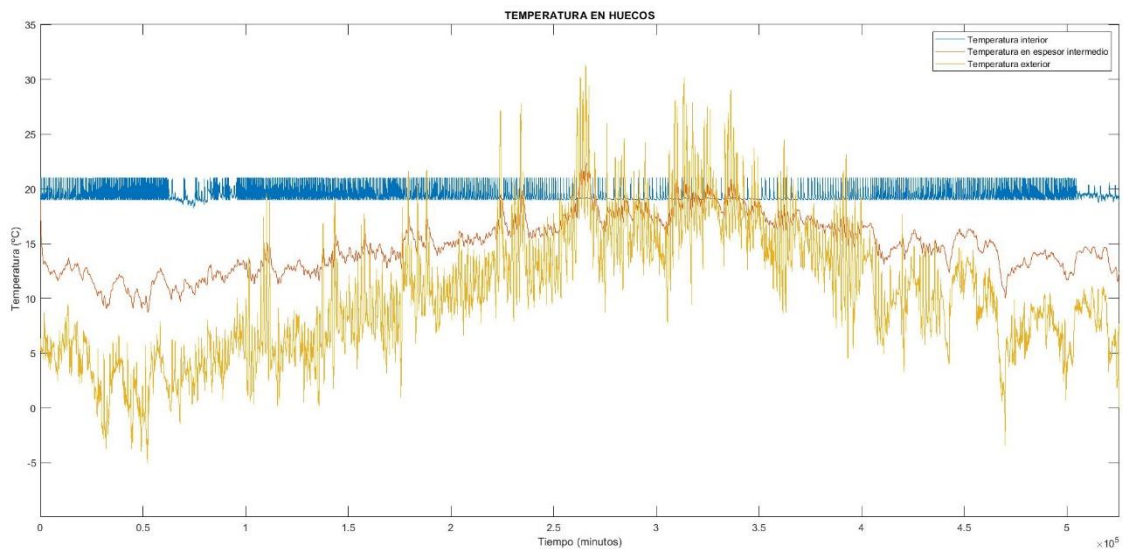


Figura 23: Evolución de la temperatura interior, huecos y exterior durante un año. Simulink

Renovaciones

Las renovaciones de aire tienen como objetivo mejorar la calidad del aire en las viviendas debido a la gran cantidad de partículas de todo tipo que en él se concentran. Es un aspecto de gran importancia y como tal se encuentra recogido en la normativa actual, entre ella en el Código Técnico de Edificación.

En vivienda convencional, las renovaciones se producen por filtraciones de aire exterior a través de huecos en los cerramientos (bajo de puertas, ventanas de cierre imperfecto, etc.), que se traduce en una ganancia (en verano) y pérdida (en invierno) de calor. La tendencia actual es realizar una renovación controlada mediante extracción mecánica a través de bocas ubicadas en zonas húmedas, mientras que las aportaciones han de realizarse a través de aireadores instalados en las zonas más secas [6]. Las renovaciones de aire son un aspecto que ha variado mucho estos últimos años, pasando de sistemas cuya única finalidad era conectar el interior y exterior del edificio a desarrollados intercambiadores de calor capaces de controlar los flujos de entrada y salida.

La renovación mediante entrada directa del aire exterior provoca la máxima pérdida/ganancia de calor por renovaciones, que se traduce en mayores consumos del sistema de calefacción/refrigeración. Para evitar esto, se introduce un intercambiador de calor tal y como muestra la figura siguiente. En esta se observa el funcionamiento en invierno, donde el intercambiador consigue que la temperatura de renovación no sea la exterior (0°C) sino otra mayor (18°C) cercana a la temperatura interior (20°C).

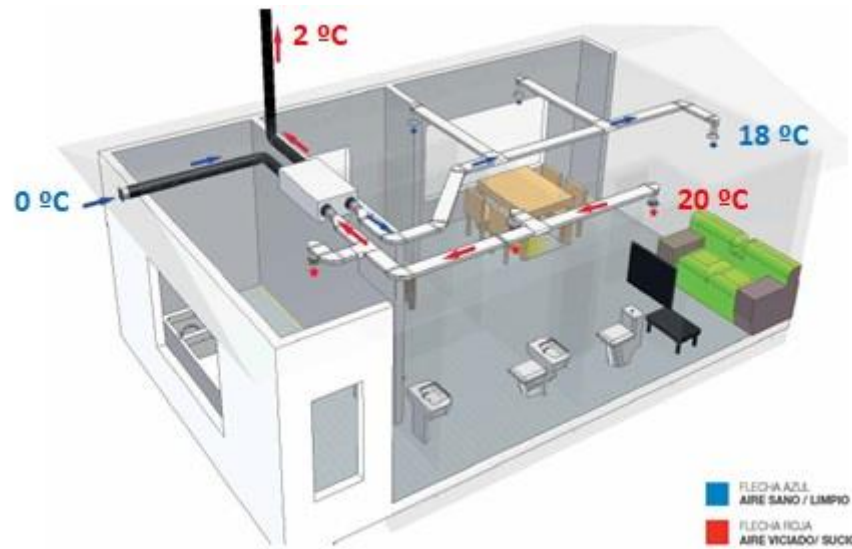


Figura 24: Funcionamiento del intercambiador en invierno

Con el fin de modelar dicho aspecto, se ha diseñado un intercambiador de cuyo funcionamiento dependerá de dos parámetros variables dependientes del tipo de edificio en cuestión: La eficiencia y el número de renovaciones por hora. Para ello se parte de las siguientes tres ecuaciones

$$\varepsilon = \frac{T_{entrada} - T_{ambiente}}{T_{interior} - T_{exterior}}$$

Ecuación 15

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{entrada} - T_{interior})$$

Ecuación 16

$$\dot{m} = \frac{V_{interior} \cdot n \cdot \rho_{aire}}{3600}$$

Ecuación 17

donde

ε : es la eficiencia del intercambiador

\dot{Q} : Potencia calorífica entrante/saliente [W]

\dot{m} : Flujo másico de aire renovado [kg/s]

C_p : Calor específico del aire [J/kg °C]

V : Volumen del aire en el interior [m³]

n : número de renovaciones por hora

ρ : Densidad del aire [kg/m³]

y de donde tras su conveniente desarrollo se llega a la ecuación 18 que es como ha sido modelado el sistema.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot [T_{interior} \cdot (\varepsilon - 1) + T_{exterior} \cdot (1 - \varepsilon)]$$

Ecuación 18

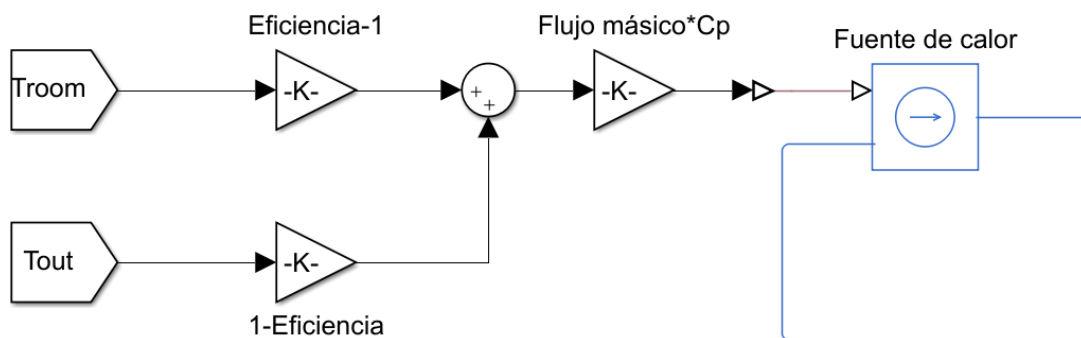


Figura 25: Modelo del intercambiador de calor. Simulink

Como muestran la ecuación obtenida y el esquema del modelo, la potencia calorífica será mayor cuanto menor sea la eficiencia del intercambiador y cuanto mayor sea el flujo másico, a su vez proporcional al número de renovaciones por hora de la vivienda. Para las situaciones más extremas se obtienen los siguientes resultados:

$$\text{Para } \varepsilon = 1 \quad \dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot [T_{interior} \cdot (1 - 1) + T_{exterior} \cdot (1 - 1)] = 0 \text{ W}$$

$$\text{Para } \varepsilon = 0 \quad \dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot [T_{interior} \cdot (0 - 1) + T_{exterior} \cdot (1 - 0)] = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{exterior} - T_{interior})$$

Como cabe esperar, una eficiencia unitaria supone un intercambiador ideal el cual elevaría la temperatura exterior hasta la temperatura del aire interior, antes de entrar a la vivienda. Una eficiencia nula por su parte modela una entrada de aire externo sin pasar por ningún calentador, lo que sucede cuando se abre una ventana. Por último, cabe resaltar el sentido del flujo: Para situaciones donde $T_{exterior} > T_{interior}$ el flujo será entrante, mientras que si $T_{exterior} < T_{interior}$, que será cuando se haga uso de la calefacción, el flujo será saliente, con sus consecuentes pérdidas. Los intercambiadores reales se sitúan siempre entre 0,5 y 0,9.

Para concluir, se muestran dos gráficas con diferente número de renovaciones y eficiencia del intercambiador, donde se reafirma la importancia de este elemento.

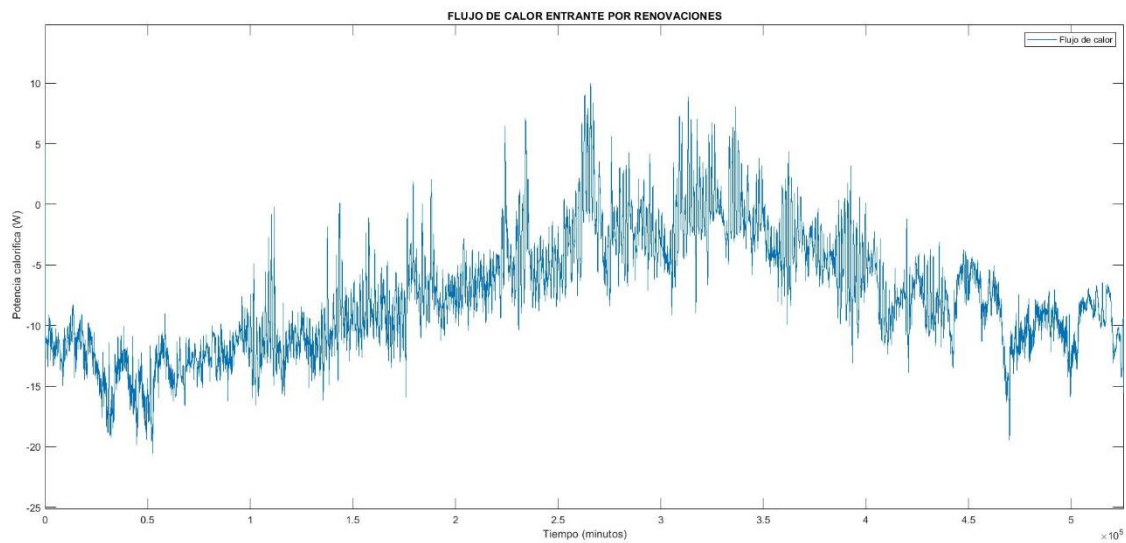


Figura 26: Flujo de calor entrante para intercambiador de 0,6 renov/hora y eficiencia 0,9. Simulink

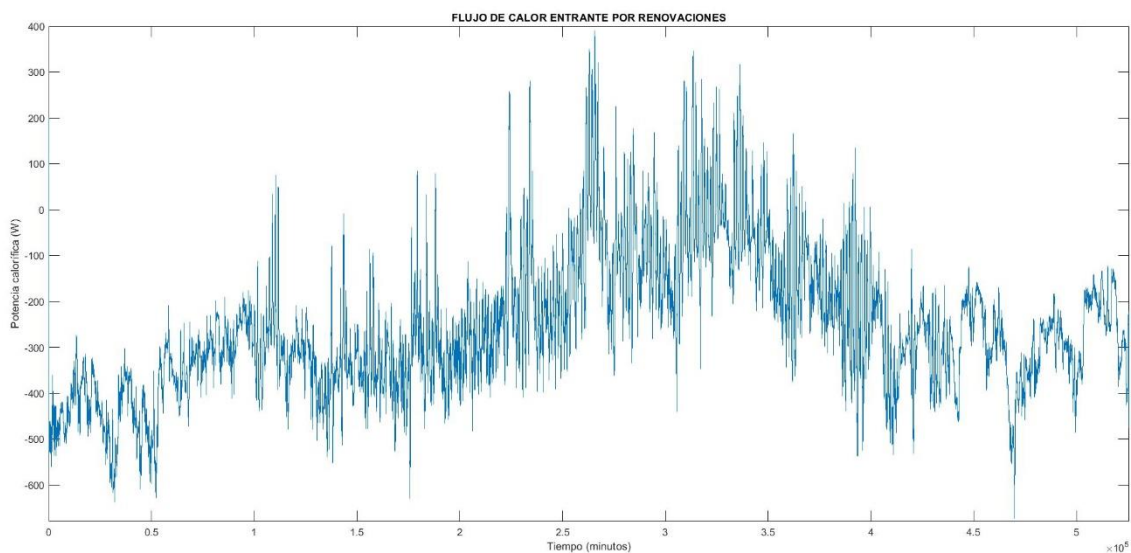


Figura 27: Flujo de calor entrante para intercambiador de 5 renov/hora y eficiencia 0,5. Simulink

Partición interior

Con el fin de realizar un modelo aproximado a la realidad, este contará con una pared encargada de separar la vivienda en dos ambientes. Dicho elemento es necesario debido a la gran diferencia existente en lo constructivo, pues estas paredes cuentan con un menor espesor y los materiales utilizados no son los mismos. En cuanto a su diseño, se ha llevado a cabo un proceso similar al utilizado para las paredes exteriores, pues está basado en un circuito de resistencias y capacidades que separan la habitación uno de la habitación dos, tal y como muestra la figura (28).

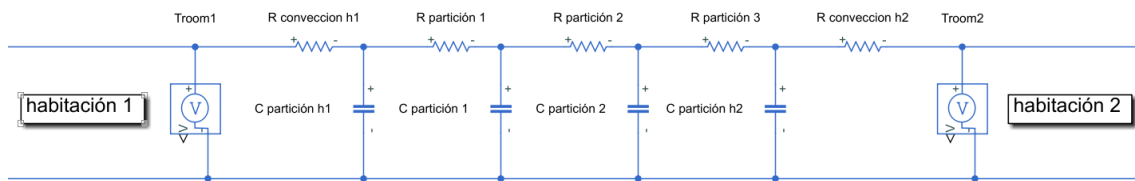


Figura 28: Modelo de la partición interna de la vivienda. Simulink

Los materiales utilizados y sus respectivos espesores son presentados a continuación [5].

Material	L (mm)	K (W/m °C)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/kg °C)
Enlucido de yeso	15	0,57	1100	1000
Ladrillo hueco	40	0,40	770	1000
Enlucido de yeso	15	0,57	1100	1000

Tabla 4: Propiedades de materiales para partición interior

A partir de dichos valores y con las ecuaciones (3), (6) y (9) se obtiene para un área de $A=11,25 \text{ m}^2$ los resultados de a continuación

Nombre	Valor (°C/W)	Nombre	Valor (J/°C)
R convección h1	0,0059	C partición h1	9,2813e+04
R partición 1	0,0023	C partición 1	1,7044e+05
R partición 2	0,0089	C partición 2	1,7044e+05
R partición 3	0,0023	C partición h2	9,2813e+04
R conveccion h2	0,0059		

Tabla 5: Resistencia y capacidad de materiales para partición interior

Por último se muestra su comportamiento

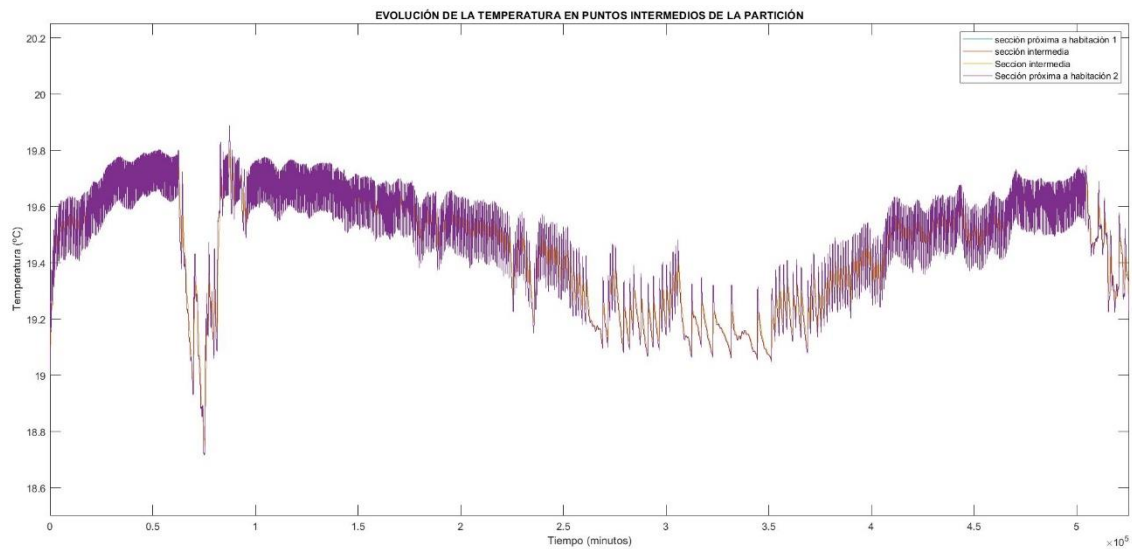


Figura 29: Evolución de la temperatura en el interior de la partición a lo largo del año. Simulink

La figura 29 muestra el comportamiento de secciones intermedias de la partición. Un primer indicativo de su correcto funcionamiento lo da el hecho de poder únicamente distinguir dos gráficas de cuatro. Eso se debe a la parametrización con la que ha sido llevada a cabo dicha simulación, pues ha sido realizada para dos habitaciones de las mismas características y a las que se les ha suministrado la misma potencia. También se observa una mayor oscilación en la gráfica morada, debido a su mayor proximidad hacia la habitación y su menor inercia térmica. Un análisis más completo de la partición será llevado a cabo a continuación, estudiando el comportamiento del sistema térmico en su conjunto.

5.3.1.3. Validación del funcionamiento del modelo térmico

En este último apartado se llevará a cabo la implementación del modelo térmico completo y se discutirá su comportamiento tanto para una única habitación como para dos habitaciones separadas por una partición interior. Las simulaciones y resultados que se verán a continuación para el segundo caso han sido fruto de un modelo basado en dos habitaciones completamente iguales cuyos valores han sido calculados previamente y cuya única diferencia se encuentra en la potencia que les ha sido suministrada. Esta potencia además será proporcionada de manera exclusiva por un generador fotovoltaico, de manera que los resultados muestren variaciones en zonas de interés.

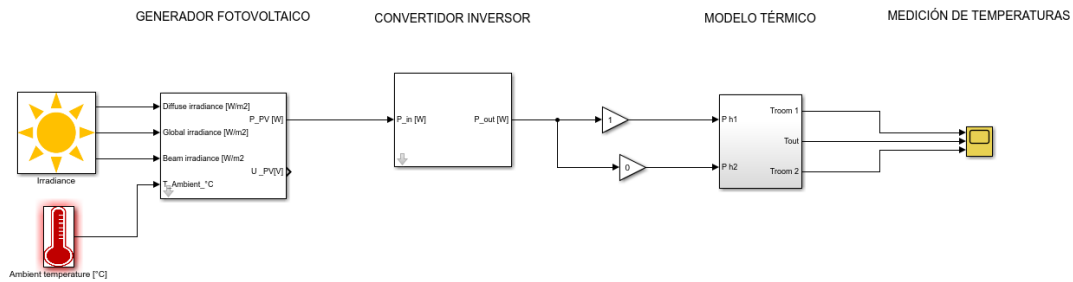


Figura 30: Unión del modelo térmico completo al sistema fotovoltaico. Simulink

Resultados para una habitación

En primer lugar se analizará un modelo con una sola habitación que cuenta con los distintos elementos analizados anteriormente, tal y como muestra la imagen inferior.

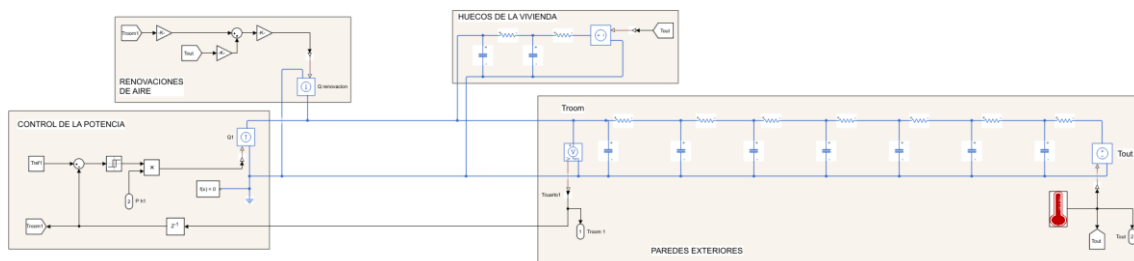


Figura 31: Modelo térmico completo de una habitación. Simulink

En su lado izquierdo se observan las dos fuentes de calor con las que cuenta el sistema: La inyección de potencia proveniente de la generación fotovoltaica y el flujo bidireccional que suponen las renovaciones de aire en las viviendas. A su derecha se encuentran las dos ramas por las que puede ser disipado ese calor.

Para analizar su posible comportamiento, se comprobarán por una parte los flujos por las diferentes ramas, verificando su funcionamiento y por otra parte la temperatura de la habitación y su intento por mantenerse en el rango fijado por el usuario, que es el mencionado en el apartado de generación.

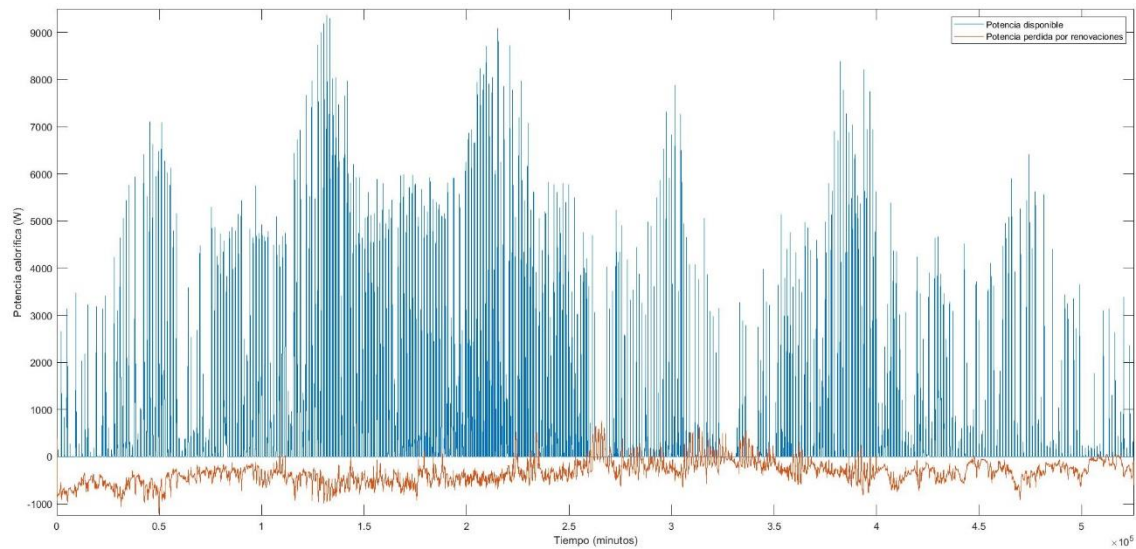


Figura 32: Potencia fotovoltaica y pérdidas por renovaciones anual. Simulink

La figura 32 representa los flujos de calor entrantes en el sistema. En azul se muestra la potencia proveniente del generador. Se trata de una potencia entrante muy irregular fruto de la variabilidad en el recurso que supone la irradiancia solar y cuyos valores muestran un probable buen funcionamiento, con valores menos elevados en los primeros y últimos meses del año que además supondrá todo el recurso disponible, y con una utilización notablemente inferior en los meses de verano donde las elevadas temperaturas no hagan necesario su uso. En rojo se muestra la evolución del flujo de calor como consecuencia de las renovaciones de aire, resultados con sentido al observarse un flujo saliente del edificio en periodos fríos y entrante en ciertos tramos de verano con motivo de temperaturas más elevadas que las de la vivienda.

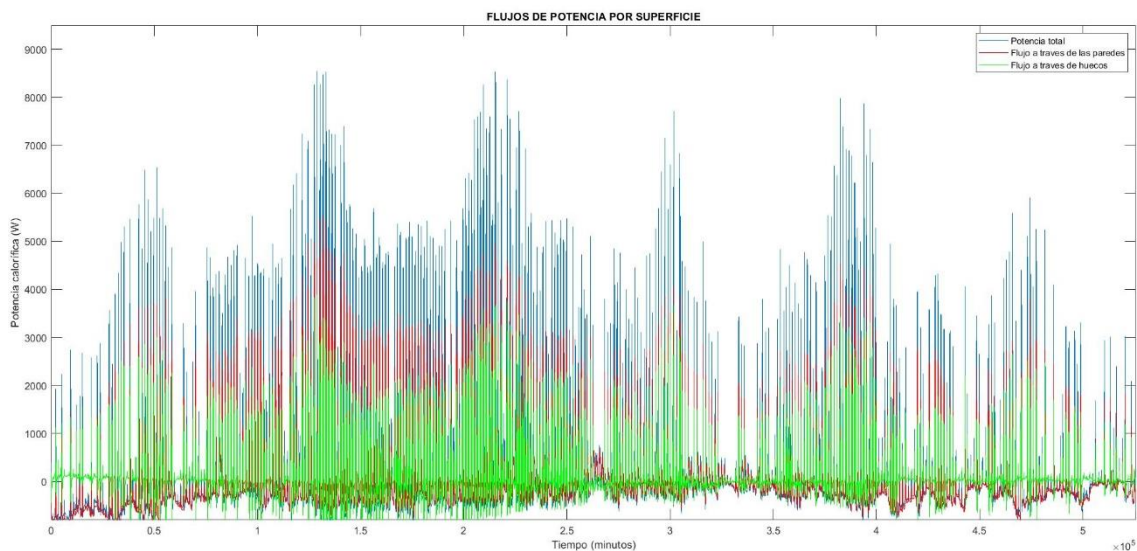


Figura 33: Potencia disipada por las superficies de la habitación. Simulink

Esta segunda gráfica muestra los flujos de calor a través de la superficie compuesta por la pared exterior. Pese a una mayor resistencia e inercia de las paredes, una mayor potencia calorífica es disipada por estas en lugar de por los cerramientos, debido a su mayor superficie en el caso de estudio.

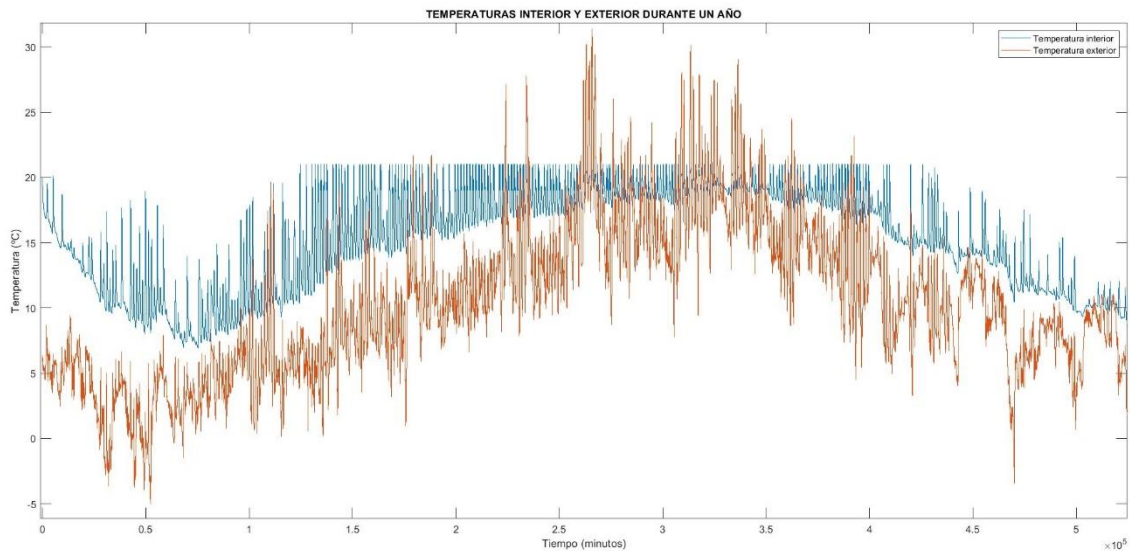


Figura 34: Evolución de la temperatura interior y exterior. Simulink

En tercer lugar se muestra la evolución temporal de las temperaturas interior y exterior en azul y rojo respectivamente, y donde se comprueba el intento del modelo por mantener la temperatura del interior del edificio en dentro de los márgenes impuestos por la consigna. Durante los primeros meses del año la irradiancia solar no es suficiente para inyectar la potencia necesaria en el sistema, provocando una considerable caída respecto a los 20°C de consigna y con un comportamiento que se asemeja al de la temperatura ambiente. Lo mismo sucede para los últimos meses.

Durante los meses más cálidos del año, su comportamiento cambia notablemente como se muestra en la siguiente figura

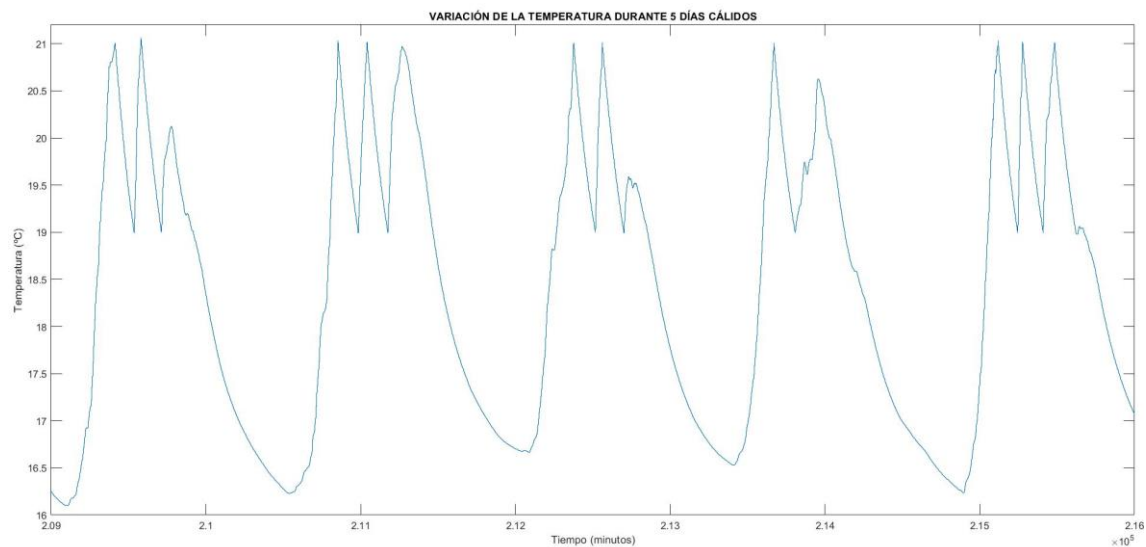


Figura 35: Evolución de la temperatura interior durante 5 días. Simulink

El modelo logra mantener la temperatura interior en el rango definido entre 19 y 21 grados durante el día, mientras que por la noche esta desciende hasta cerca de los 16°C debido a la nula radiación incidente.

Resultados para dos habitaciones

Se lleva a cabo el mismo análisis con la implementación de una segunda habitación separada por una partición. Esta variación supone un importante cambio respecto al modelo anterior, pues conlleva la aparición de un flujo de calor extra que atraviesa la partición interior y, como consecuencia, calienta la habitación contigua. Dicha transferencia de calor se encuentra condicionada por la temperatura en ambas habitaciones, de manera que fluye de la habitación de mayor a la de menor temperatura.

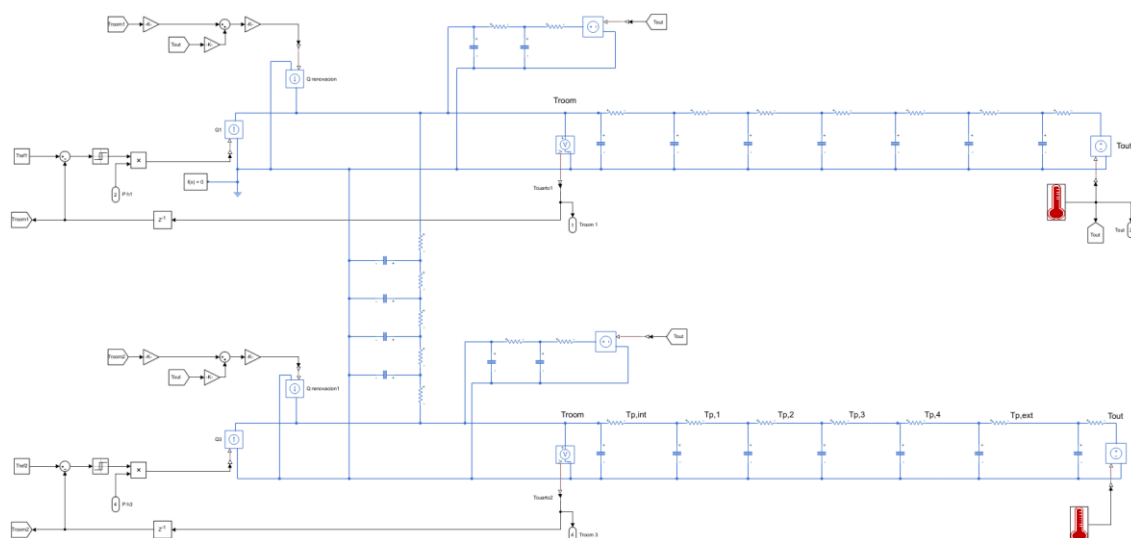


Figura 36: Modelo térmico completo para vivienda de dos habitaciones. Simulink

Tal y como se ha anticipado, la figura 36 muestra el modelo térmico de cargas completo de una vivienda con dos habitaciones separadas mediante una pared. Su diseño se ha desarrollado de manera que las diferentes entradas y salidas de potencia calorífica de los bloques mencionados anteriormente queden dispuestos en paralelo. También se ha logrado diseñarlo de manera que cada habitación cuente con su control permitiendo una mayor flexibilidad en su uso y que consta como una de las ventajas del sistema de calefacción en estudio.

En lo que a su funcionamiento se refiere, su estudio se centrará en la validez del modelo a la hora de la transmisión de calor entre habitaciones, puesto que la comprobación del modelo para una sola habitación ya ha sido realizada.

El primer análisis se lleva a cabo por medio de la temperatura interior de la segunda habitación, dependiendo del calor introducido en la habitación primera.

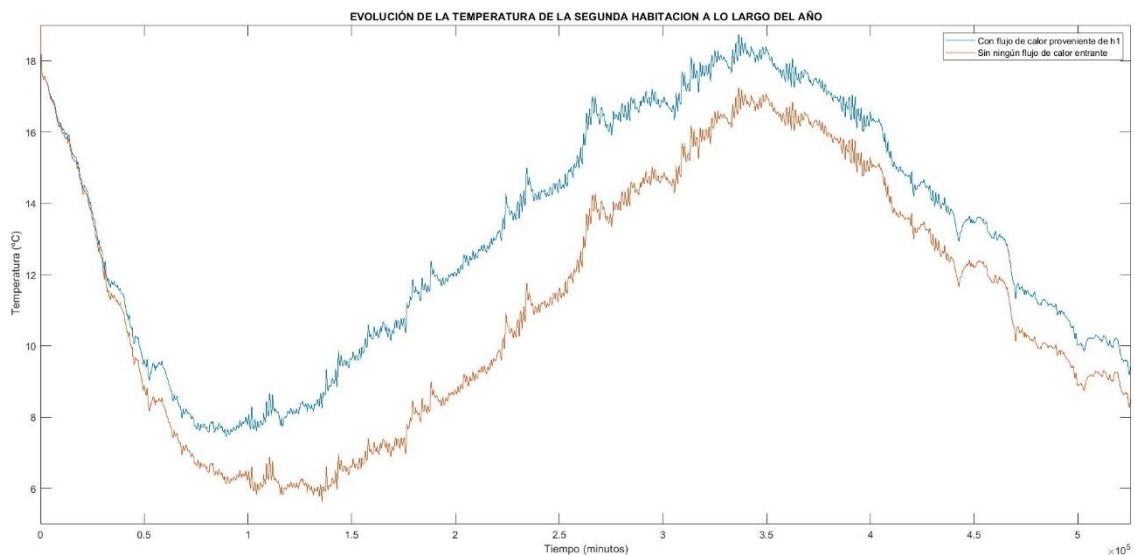


Figura 37: Evolución de la temperatura en la habitación 2 para dos casos diferentes. Simulink

La figura 37 muestra de manera clara una diferencia de temperaturas para los dos casos más extremos a analizar: en azul, la temperatura de la habitación 2 cuando a la primera le es inyectada toda la potencia disponible; en rojo, la misma temperatura cuando a la primera habitación no le es introducida potencia. Este resultado transmite un posible flujo que circula de la habitación 1 a la 2, elevando su temperatura por encima de la que se obtendría si no circulara nada.

A continuación se muestra la gráfica que confirma lo visto en la figura 37.

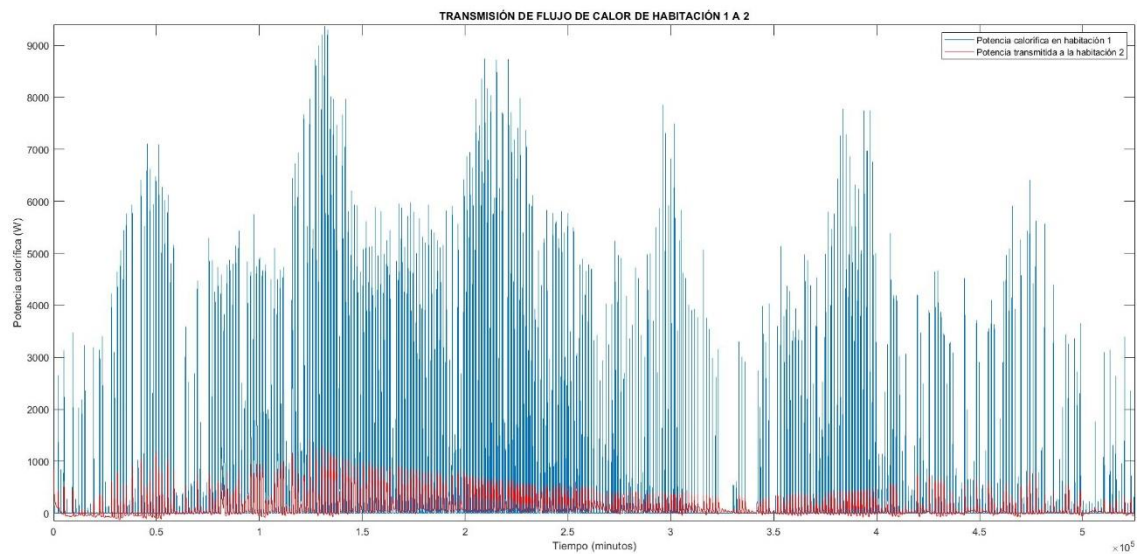


Figura 38: Potencia calorífica transmitida de la habitación 1 a la habitación 2. Simulink

En ella se ve claramente como parte de la potencia calorífica es transmitida a la segunda habitación a través de la partición y que lo hace durante todo el año, coincidiendo con la idea de que la transmisión es llevada a cabo de la mayor a la menor temperatura, siendo en este caso la primera y segunda habitación respectivamente.

En tercer lugar se muestra la figura 39 donde se tienen las temperaturas de las dos habitaciones y las de diferentes secciones de la partición, confirmando lo dicho hasta el momento.

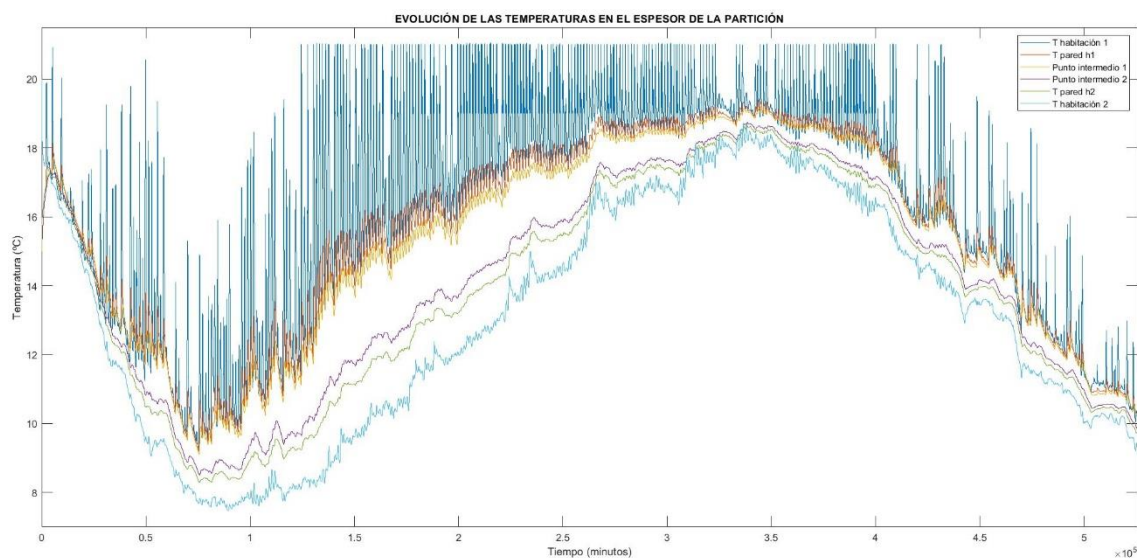


Figura 39: Evolución de la temperatura de las habitaciones. Simulink

5.3.2. Parte eléctrica

5.3.2.1. Introducción

El anterior apartado ha dejado patente el problema que supone la utilización del recurso solar disponible en cada instante como única fuente de alimentación, no pudiendo lograr los niveles de generación exigidos por el consumo durante los periodos más fríos y desaprovechando su potencial durante los meses de verano. Para que esto no suceda se llevará a cabo el diseño de un modelo flexible, capaz de almacenar energía en momentos donde el sistema no lo necesite y de proporcionarla cuando lo sea y que contará también con conexión a red, posibilitando la compraventa de energía.

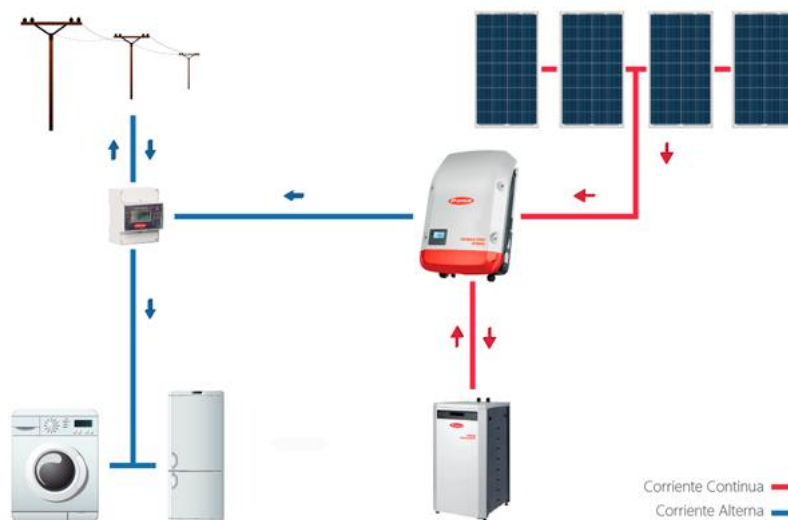


Figura 40: Esquema unifilar de la instalación eléctrica planteada

A continuación se llevará a cabo el diseño de los diferentes elementos de los que está compuesto el modelo, así como su desarrollo y comportamiento.

5.3.3.2. Modelo

- **Generador fotovoltaico**

Como ya se ha explicado, se trata de un modelo realizado para la herramienta y que no ha sido modificado durante el transcurso del presente trabajo. Como muestra la imagen posterior, este consta de cuatro grandes bloques entre los que se encuentra el cálculo de la irradiancia cuyas entradas son las condiciones de irradiancia del lugar, el cálculo del envejecimiento del panel y el cálculo de tensión y potencia nominales, siendo esta potencia la que entre en el convertidor.

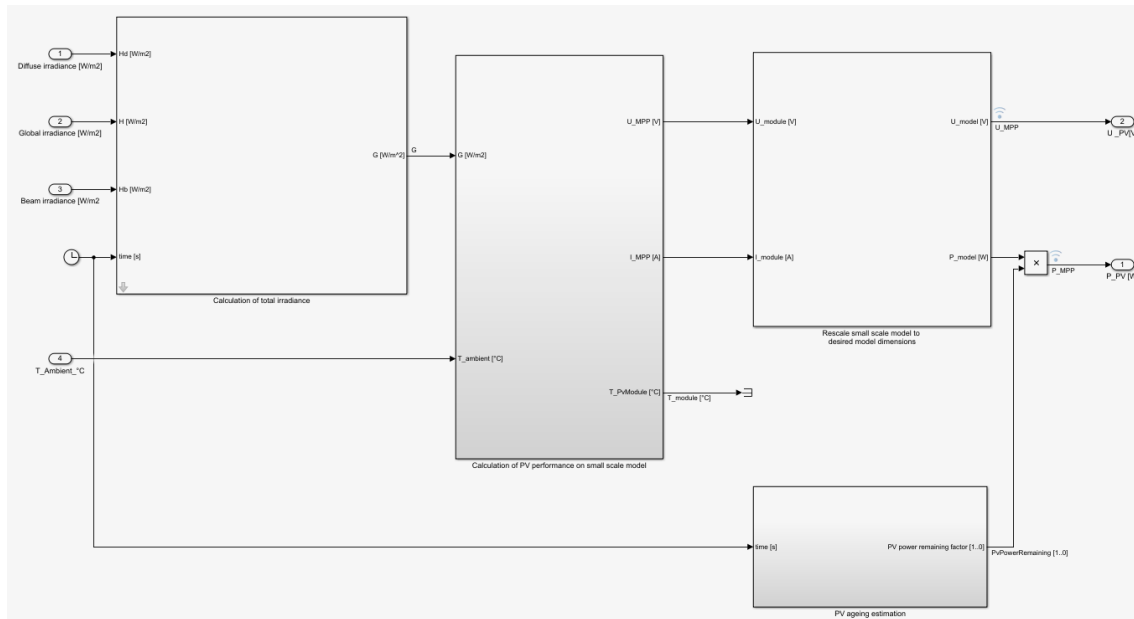


Figura 41: Modelo del generador fotovoltaico. TILOS

El modelo cuenta además con una serie de parámetros modificables por el usuario que permitirán realizar simulaciones de una manera más precisa en función de su ubicación y no solamente de sus características técnicas.

Parameters	
PV peak power [kWp]	<input type="text" value="3.906*2"/>
PV peak voltage [V]	<input type="text" value="650"/>
Latitude angle of location [°]	<input type="text" value="52.210"/>
Longitude angle of location [°]	<input type="text" value="14.1220"/>
Azimuth angle of solar panel [°]	<input type="text" value="0"/>
Solar panel inclination [°]	<input type="text" value="35"/>
UTC offset	<input type="text" value="1"/>
PV ageing factor [1..0] per 365 days, e.g. 0.95 means that 95% PV power remains after 1 year	<input type="text" value="1"/>

Figura 42: Parámetros de entrada del generador fotovoltaico. TILOS

- **Inversor**

Al igual que el generador, el inversor forma también parte de TILOS. Tiene como variable de entrada la potencia proveniente del generador y como salida la potencia con corriente alterna correspondiente. Pese a ser usado como inversor en este caso para la generación de un panel fotovoltaico, se trata de un modelo de inversor general y que puede ser utilizado en modelos con diferente finalidad.

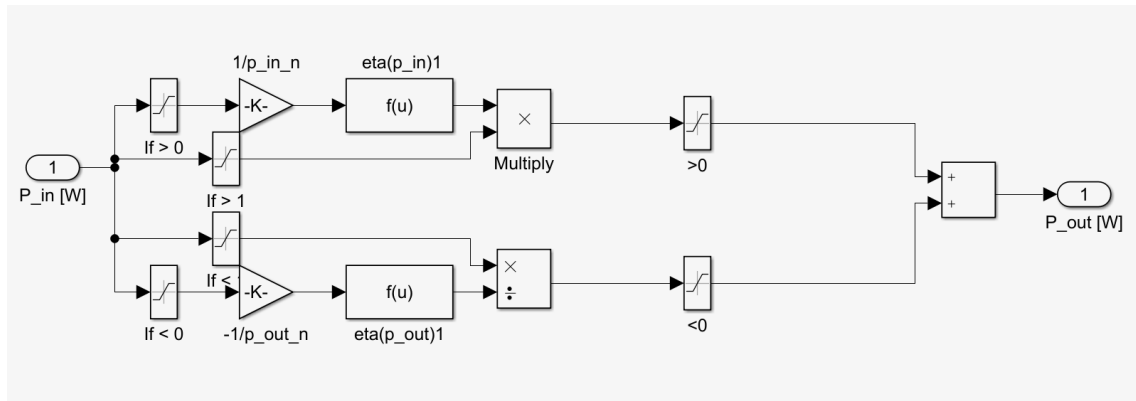


Figura 43: Modelo del inversor. TILOS

Entre los parámetros a modificar para un comportamiento lo más cercano al caso real posible, destacan la eficiencia nominal y la potencia de referencia, pudiendo ser esta última bien de entrada o bien de salida.

Una vez definidos tanto los parámetros del generador como del inversor se obtiene la siguiente gráfica

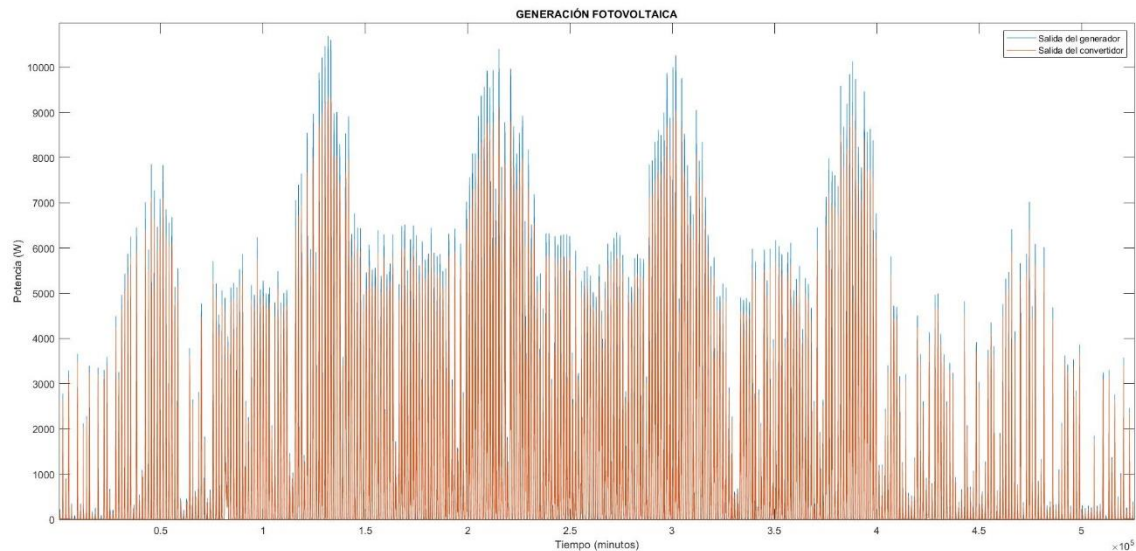


Figura 44: Potencia de salida de generador y convertidor. Simulink

En la figura 44 se muestran las gráficas de potencia de salida del generador y convertidor, en azul y en rojo respectivamente, y quedan definidas por los parámetros de diseño introducidos por el usuario y las entradas de datos de radiación utilizadas.

- **Bus**

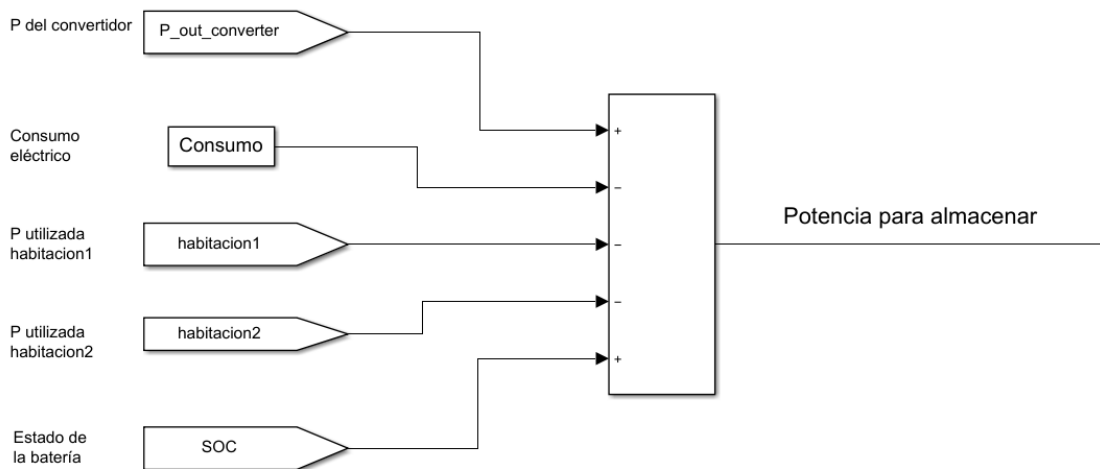


Figura 45: Bus eléctrico. Simulink

La figura 45 muestra la modelización del bus de entradas y salidas de las potencias que componen el sistema. Entre las fuentes que aportan potencia se encuentran por un lado el generador fotovoltaico que dependerá de la irradiancia disponible y por otro lado la batería, que será capaz de proporcionar la potencia necesaria y cuyo modelo veremos en el próximo apartado. En cuanto a la potencia consumida, estará compuesta por la suma del consumo eléctrico de una vivienda en su sentido más tradicional y el consumo en calefacción de las dos habitaciones. De dicho balance se obtendrá una determinada potencia disponible para su almacenamiento, que será mayor en los periodos de mayor temperatura debido a la no necesidad de calefacción y mayor irradiancia y menor o nula en los periodos fríos de calefacción y nula irradiancia.

- **Batería**

El análisis llevado a cabo del modelo de cargas térmicas y su posterior unión con el generador fotovoltaico y su convertidor muestran, tal y como se ha visto en la figura 34, la necesidad de un sistema de almacenamiento de energía con el que poder hacer frente a los periodos de mínima radiación que se dan durante los primeros y últimos meses del año. Por ello, se llevará a cabo el modelo de una batería con la que evitar dicha falta de energía y su posterior análisis económico.

La batería en cuestión deberá proporcionar la energía necesaria durante los momentos de baja irradiancia para satisfacer el consumo de la vivienda. Como ya se ha comentado anteriormente, el mayor obstáculo reside en la nula irradiancia y en consecuencia nula potencia en temporadas de bajas temperaturas, por lo que la batería será modelizada de manera que sea capaz de extraer potencia de la red si fuera necesario. En este punto, se abre la posibilidad de verter, de la misma manera que se extrae, potencia a la red, y dependerá de la potencial energía desaprovechada durante los meses de mayor irradiancia.

La figura 46 muestra el inicio del modelo implementado para el sistema de almacenamiento.

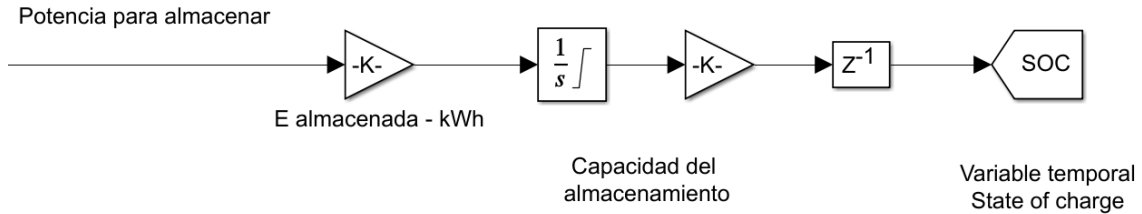


Figura 46: Modelo para obtención del estado de carga del almacenamiento. Simulink

La potencia proveniente del bus es convertida en energía mediante

$$W \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \cdot 1 \text{ min} \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \quad [\text{kWh}]$$

para a continuación modelizar el que será su primer parámetro a definir por el usuario: Su capacidad. Esta es llevada a cabo mediante un limitador de manera que la energía almacenada no pueda sobrepasar ese valor en ningún momento. También se añade una ganancia de valor inverso a la capacidad del almacenamiento que permitirá mantener el valor de la variable *state of charge* en un rango de cero a la unidad, que se utilizará como condición de entrada para uno u otro comportamiento. La figura 48 muestra como el estado de carga variará en un rango de valores de entre 0 y 1.

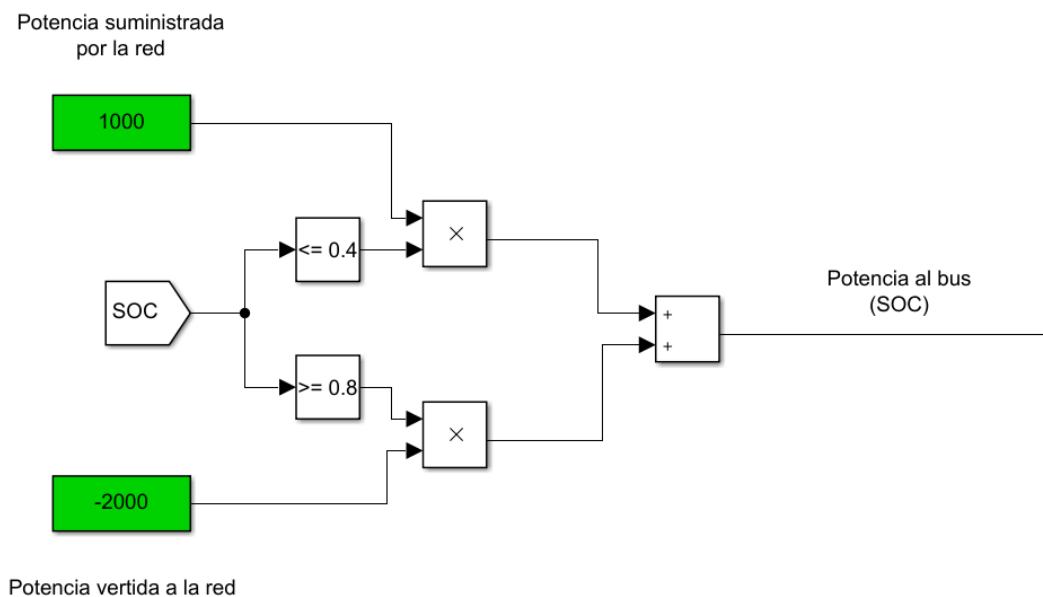


Figura 47: Modelo del control de los intercambios de potencia con la red. Simulink

La figura 47 muestra el control del estado de carga de la batería. Para ello, y tal y como se ha mencionado al inicio, la batería estará conectada a la red de distribución, de manera que a partir de la variable *state of charge* obtenida en el esquema anterior la batería realice una orden u otra. En cuanto al modelo, en este caso se han considerado potencias con valores de 1000 W para potencia suministrada por la red y 2000 W para la potencia vertida por parte del sistema a la red. Dado que la finalidad del sistema de almacenamiento es la de inyectar la energía necesaria en momentos de insuficiente generación, se delimita el rango de intercambio de flujos entre los sistemas, de manera que en este caso la red únicamente suministre potencia para una capacidad del almacenamiento menor al 40% y vierta potencia por encima del 80% de su capacidad máxima.

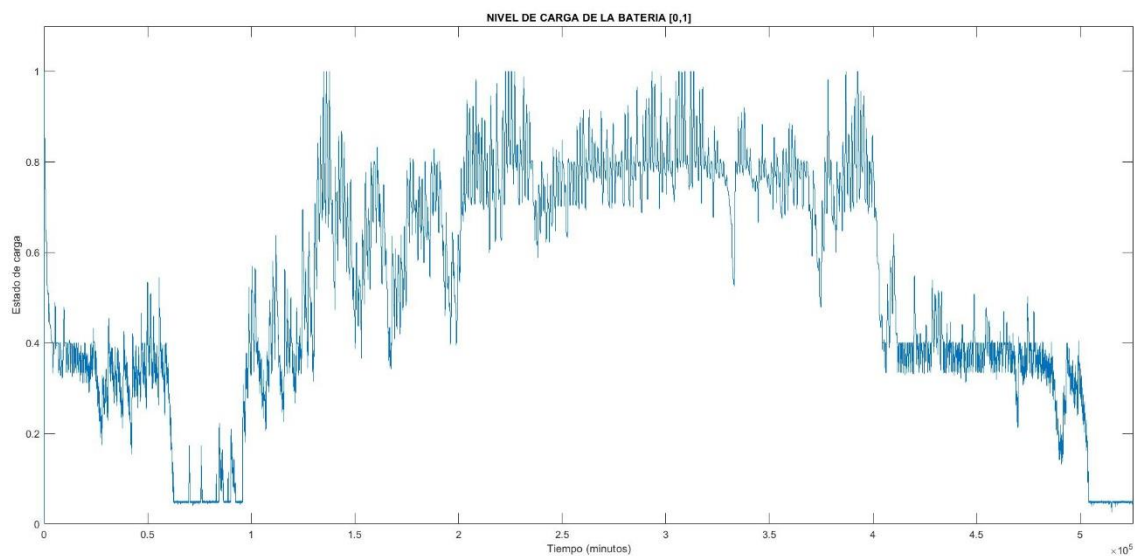


Figura 48: Estado de carga de la batería. Simulink

Las gráficas 48 y 49 muestran el comportamiento previamente descrito en sus diferentes rangos. La primera describe la evolución durante todo el año del estado de carga de la batería, alcanzando valores pico en su capacidad máxima en verano y con valores en torno al 40% durante el resto del año. Además, se observan dos intervalos en los que la capacidad cae muy por debajo de este límite, indicativo de una falta de suministro.

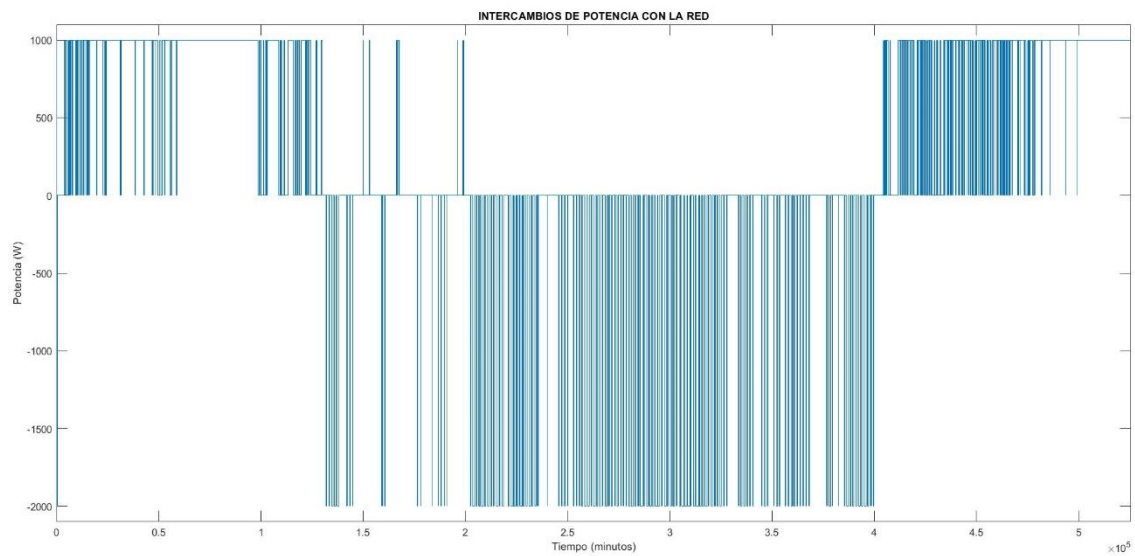


Figura 49: Intercambios de potencia entre red y vivienda. Simulink

Esta segunda gráfica sirve como complemento a la primera y describe los periodos de suministro y vertido de energía de la red. También confirma lo sucedido con el almacenamiento por debajo del 40%, pues muestra como el sistema absorbe potencia de la red de manera continua.

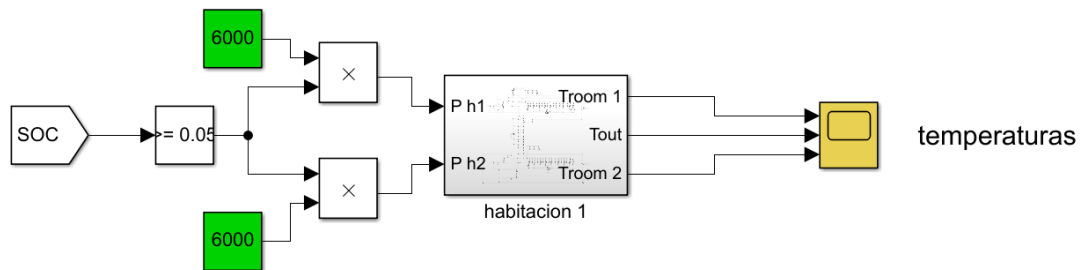


Figura 50: Modelo de inyección de potencia para calefacción. Simulink

Como tercera y última parte del modelo referente al almacenamiento se muestra el comportamiento del sistema ante el suministro de potencia para la calefacción. Este podrá proporcionar 6000 W de potencia a cada una de las habitaciones siempre que el estado de carga sea superior al 5%, límite impuesto para que no suministre toda su energía. Al igual que en el resto del modelo y su control, las variables de potencia de entrada y límite inferior podrán ser definidas por el usuario, dependiendo del modelo y situación que se pretenda simular.

Por último se muestran dos gráficas donde quedan representadas la potencia disponible durante el año y la temperatura interior, donde destacan los tramos que muestran una capacidad de almacenamiento situada alrededor del 5% y su consecuente nula potencia entrante, disminuyendo la temperatura interior por debajo de 19°C.

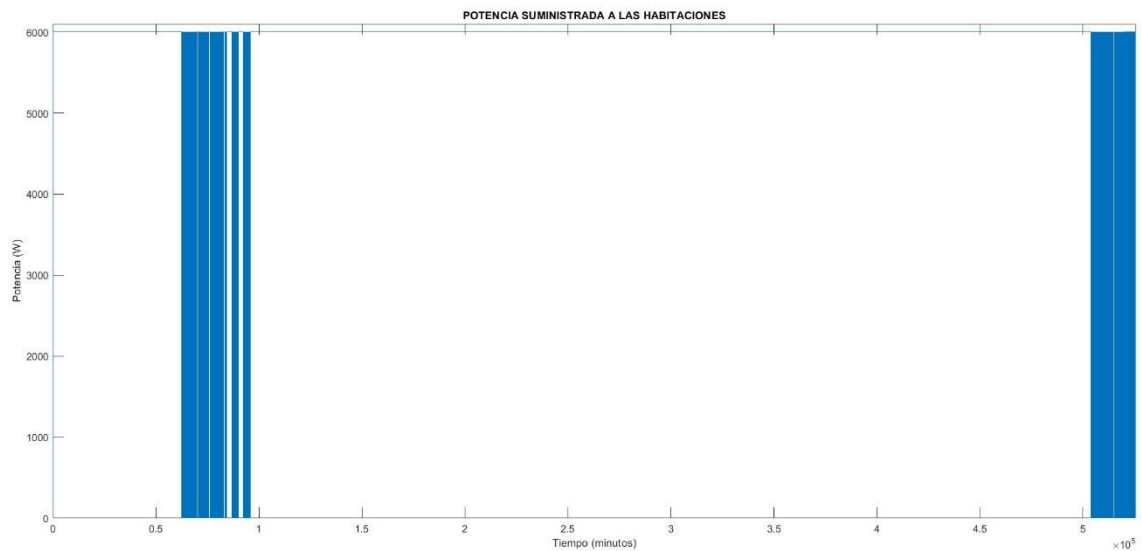


Figura 51: Potencia disponible para el sistema de calefacción. Simulink

La figura 51 muestra que existe una casi total disponibilidad de potencia durante todo el año, a excepción de los dos periodos en los que su capacidad cae por debajo del 5%, provocando los dos tramos irregulares mostrados.

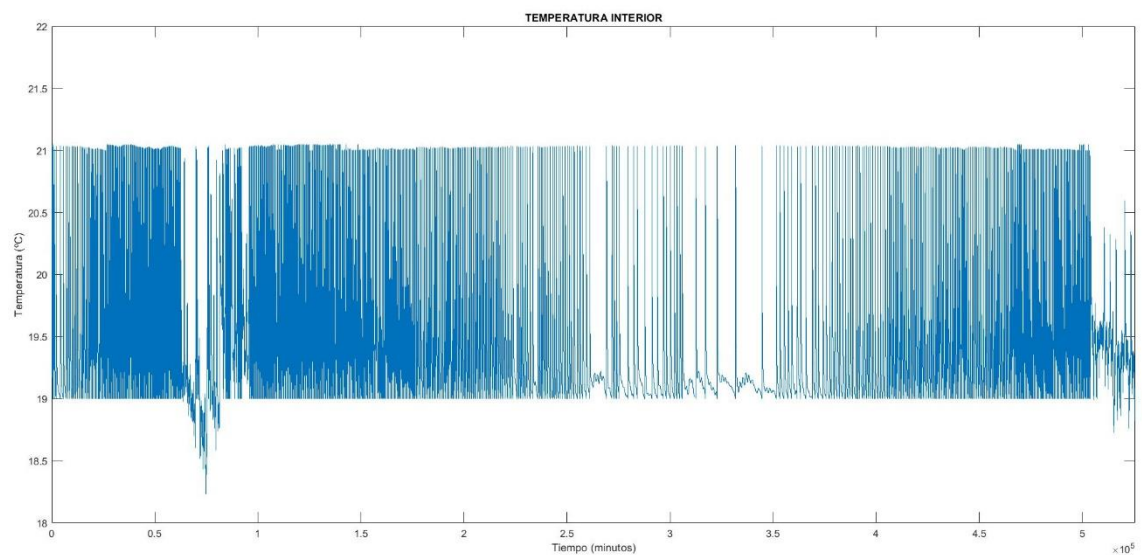


Figura 52: Evolución de la temperatura interior a lo largo del año. Simulink

- **Red**

En lo referido a la red, esta se considerará una red de potencia infinita de la que poder extraer y a la que poder verter la potencia conveniente.

5.3.2.3. Resultado

Con el diseño del apartado eléctrico completado, el modelo queda de la siguiente manera.

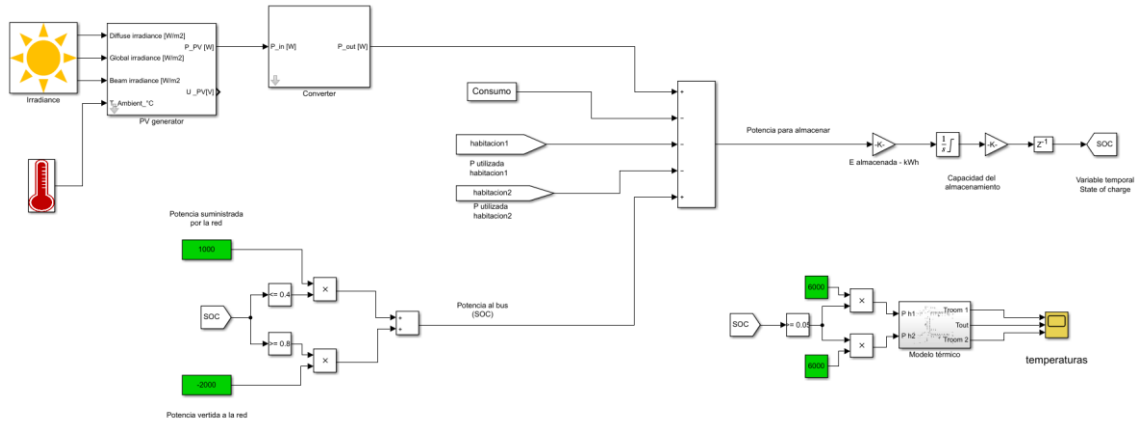


Figura 53: Unión de los modelos térmico y eléctrico completos. Simulink

La unión de los diferentes elementos se lleva a cabo de la manera mostrada durante la descripción y desarrollo de estos, obteniendo en última instancia un modelo dependiente de la evolución del estado de la batería. En lo que al comportamiento a nivel técnico se refiere, el sistema es capaz de simular todo tipo de situaciones: Con o sin almacenamiento, características de la vivienda de todo tipo, teniendo en cuenta o no otros consumos... Por lo tanto como última parte del diseño se desarrollarán las herramientas de ámbito económico que reflejen la viabilidad del sistema.

5.3.3. Análisis económico y energético

Si bien el modelo ha respondido hasta el momento de la manera esperada, un análisis económico y energético es necesario para corroborar que su respuesta tenga sentido. Por ello, se lleva a cabo el diseño de las herramientas que permitan valorar la eficiencia energética de la vivienda y los costes económicos asociados a este.

Para su análisis, se considerarán *key performance indicators* los siguientes parámetros:

- **Precio anual:** Coste anual total, dividido en los siguientes cuatro puntos:
 - Coste del sistema fotovoltaico: Será la suma del coste del generador y el inversor y se considerará un coste puntual. Como referencia se establecerá 1000 €/kWp

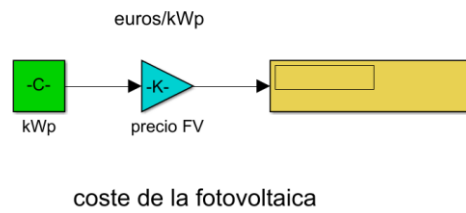


Figura 54: Bloque de cálculo de inversión en fotovoltaica. Simulink

- Coste de la batería: Se considerará un precio de 250 €/kWh.

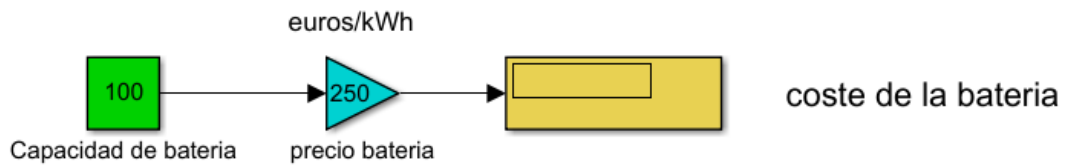


Figura 55: Bloque de cálculo de inversión en almacenamiento. Simulink

- Coste de la potencia de red: Se divide en dos, obteniendo por un lado la potencia extraída de la red y por otro la vertida a red. El precio del kWh al igual que el resto de precios podrá ser definido por el usuario. En este caso se tomará como referencia 0,13 €/kWh comprado y 0,05 €/kWh vendido.

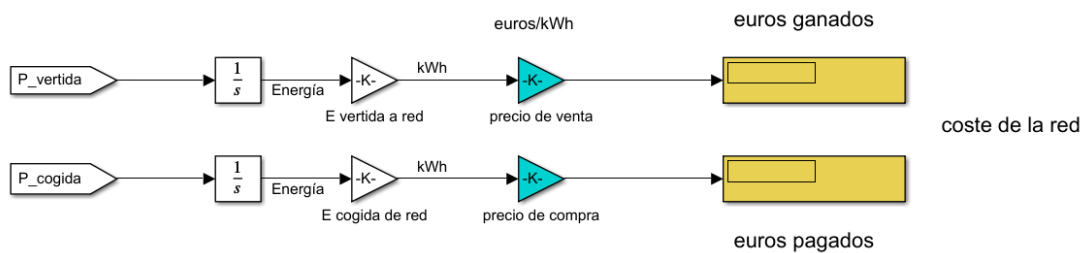


Figura 56: Bloque de cálculo del coste de energía de red. Simulink

- **Potencia pico:** Se obtendrá a la salida del bus analizado anteriormente y será su máximo valor.

- **Ratio de autoconsumo:** Se define como el porcentaje de energía consumida producida a partir del generador fotovoltaico. Se calculará como muestra la imagen.

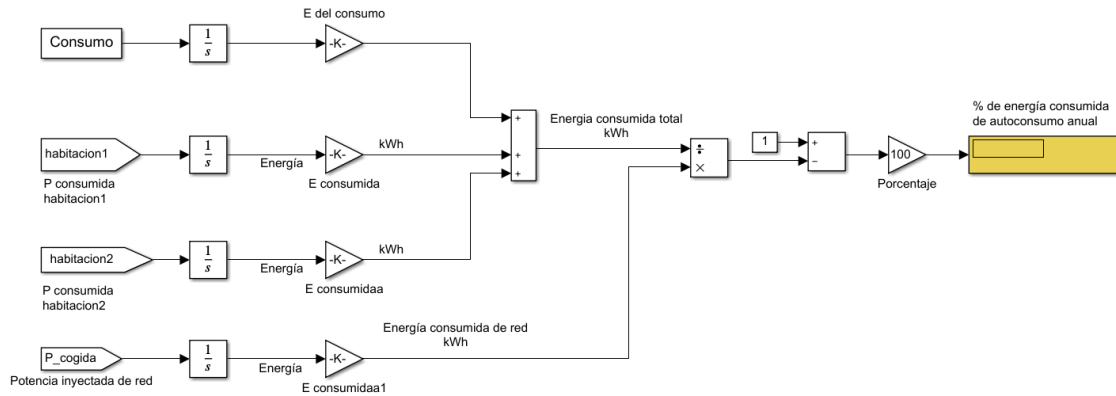


Figura 57: Bloque de cálculo del ratio de autoconsumo anual. Simulink

De esta forma, la herramienta queda completamente desarrollada.

Capítulo 6: Casos de estudio

6.1. Planteamiento

Como último objetivo del presente estudio, se llevará a cabo el análisis de dos viviendas diferentes cuyos resultados serán comparados con la finalidad de comprobar el funcionamiento de la herramienta diseñada.

Las dos viviendas a analizar serán una vivienda convencional y una passive house, ambas constituidas por dos habitaciones iguales separadas por una partición interior y cuyas características se presentan a continuación

Parámetros de entrada	Vivienda convencional	Passive house
Temperatura de referencia (°C)	20	20
Rango de error (°C)	±1	±1
Longitud de la habitación (m)	7	7
Anchura de la habitación (m)	2,5	2,5
Altura de la habitación (m)	6	6
Área de los huecos (m ²)	8	8
Espesor de los huecos (m)	0,016	0,016
Espesor de la partición (m)	0,07	0,07
Coefficiente de convección h interior (W/m ² °C)	10	10
Coefficiente de convección h exterior (W/m ² °C)	15	15
Coefficiente de convección h huecos (W/m ² °C)	3,3	3,3
Coefficiente de renovaciones (renov/hora)	4	0,6
Eficiencia del intercambiador	0	0,9

Tabla 6: Parámetros de entrada de las viviendas

*en caso de tratarse de habitaciones de diferente tamaño el usuario no tendría más que meter los valores convenientes en cada una de ellas en vez de repetirlos como sucede en este caso.

Tal y como muestra la tabla 6, la diferencia residirá en gran medida en el ámbito de las renovaciones de aire. En el caso de las passive house estas deberán tener un máximo de 0,6 renovaciones cada hora y debiendo ser realizadas de manera controlada. Además, serán llevadas a cabo por medio de un intercambiador de calor de alta eficiencia (se ha tomado 0,9), elevando la temperatura del flujo másico entrante con respecto al valor de la temperatura exterior. La vivienda convencional no contará ni con un intercambiador ni con una renovación de aire controlada como ocurre en las casas pasivas. Esto se simula considerando una eficiencia del intercambiador igual a cero (es decir, el aire exterior entra directamente a la vivienda) y un valor típico de renovaciones por hora (se ha tomado 4), que provocarán mayor cantidad de pérdidas de calor que en la casa pasiva.

Otro factor a tener en cuenta es el elevado nivel de aislamiento de las passive house. Su modelización se realizará en este caso mediante el incremento de aislante utilizado, de manera que cuente con el espesor de este que haga que la conductancia (U) de las paredes exteriores sea de alrededor de 0,1 W/m² °C.

Por tanto

$$Conductancia (U) = \frac{Conductividad (k)}{espesor (L)} = \frac{1}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \dots + \frac{L_n}{k_n}} = \frac{1}{\frac{0,015}{1,3} + \frac{0,115}{0,5} + \frac{L}{0,035} + \frac{0,04}{0,4} + \frac{0,015}{0,57}}$$

Ecuación 19

de donde se obtiene $L_{poliestireno} = 0,3 \text{ m}$

Por otra parte se definen diferentes costos asociados tanto al sistema fotovoltaico como a la red eléctrica:

- Coste del sistema fotovoltaico: 1000 €/kWp
- Coste del sistema de almacenamiento: 250 €/kWh
- Precio de compra a red: 0,13 €/kWh
- Precio de venta a red: 0,05 €/kWh

De esta manera el sistema ha quedado parcialmente definido. Dada su finalidad de simular dos modelos de vivienda con diferentes características, en la siguiente tabla se muestran los valores de las variables utilizadas para un aproximado comportamiento de ambos. La potencia del inversor se supondrá un 80% la del generador.

VARIABLES DE ENTRADA	VIVIENDA CONVENCIONAL	PASSIVE HOUSE
Potencia fotovoltaica (W)	10000	6000
Potencia del inversor* (W)	8000	4800
Capacidad de almacenamiento (kWh)	15	15
Potencia inyectada de red (W)	5000	4000
Potencia vertida a red (W)	-5000	3500
SOC_input_red	0,3	0,3
SOC_output_red	0,8	0,8
Potencia de calefacción h1 (W)	2500	1500
Potencia de calefacción h2 (W)	2500	1500
Estado mínimo del almacenamiento	0,05	0,05

Tabla 7: Valores considerados para cada vivienda

Así, el modelo queda completamente definido.

6.2. Resultados

Este apartado tendrá como objetivo el análisis de los dos modelos parametrizados previamente. Para ello se hará uso de las gráficas más significativas del modelo así como de los *key performance indicators* mencionados en el apartado 6.3.3., los cuales proporcionarán una idea al usuario del buen o mal funcionamiento del sistema.

Dado el objetivo del proyecto, el primer indicador no será otro que la temperatura en el interior de la vivienda. Dados los parámetros de entrada establecidos, cabe esperarse un resultado similar al mostrado en la figura 52 donde la temperatura ni sobrepase los 21°C ni baje de los 19°C. Dicho parámetro quedará condicionado por la potencia de calefacción del que disponga la vivienda, y este a su vez del almacenamiento o de la potencia de red consumida.

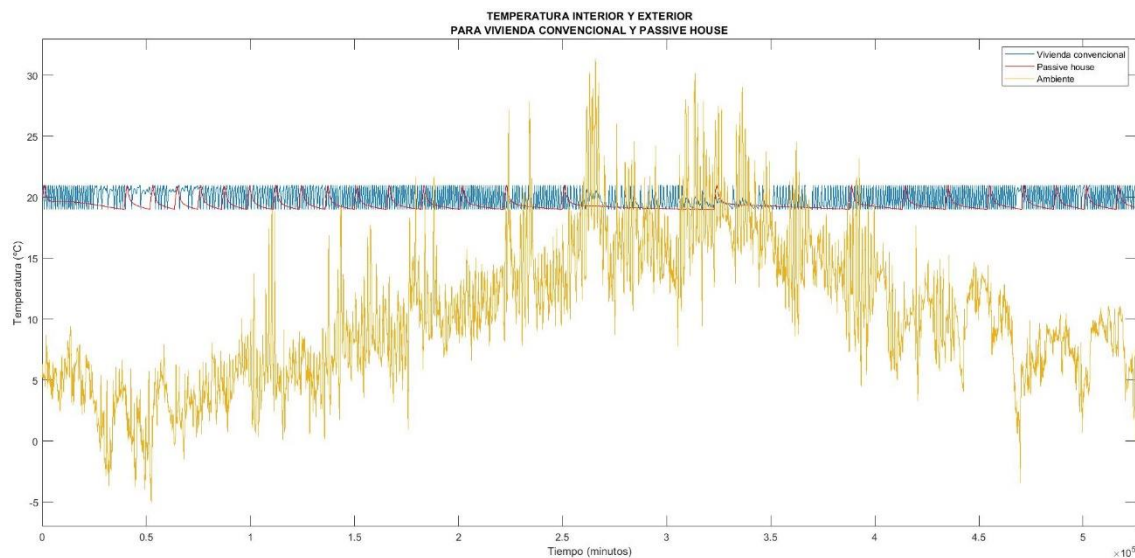


Figura 58: Temperatura interior para passive house (rojo) y convencional (azul). Simulink

La figura 58 muestra las temperaturas interiores de ambas viviendas así como la exterior. En azul se muestra la variación de temperatura para el caso convencional, que como se ve en ningún momento baja de los 19 grados Celsius, al igual que ocurre con la temperatura del interior de la passive house, dibujada en rojo.

La gran diferencia que muestra se encuentra en la cantidad de ciclos realizados por la gráfica azul. Dicho comportamiento es resultado de muy elevadas pérdidas de calor, obligando al sistema a tener que estar proporcionando energía de manera casi continua y provocando un aumento muy significativo en el consumo. Al contrario, la passive house muestra un número muy reducido de periodos en los que la temperatura interior baje hasta 19°C, consecuencia del elevado grado de aislamiento y control de las renovaciones.

La siguiente figura muestra la suma de las diferentes entradas y salidas de potencia en cada instante para ambas situaciones, de manera que se logre el valor pico de potencia en el sistema. En el caso de la vivienda estándar es remarkable la línea constante que dibuja por debajo de los 5000 W, consecuencia de una casi continua inyección de potencia de la red que concuerda con lo comentado anteriormente. En cuanto a su valor pico, este se da en torno a los 11,5 kW, probablemente consecuencia de la elevada irradiancia. Lo mismo sucede en el caso de la passive house donde la potencia se sitúa ligeramente por debajo del valor de potencia proveniente de red pero que lo hace con menor frecuencia durante todo el tramo central, fruto del escaso consumo de la vivienda. Su potencia pico alcanza los 6670 W, muy por debajo de la otra vivienda.

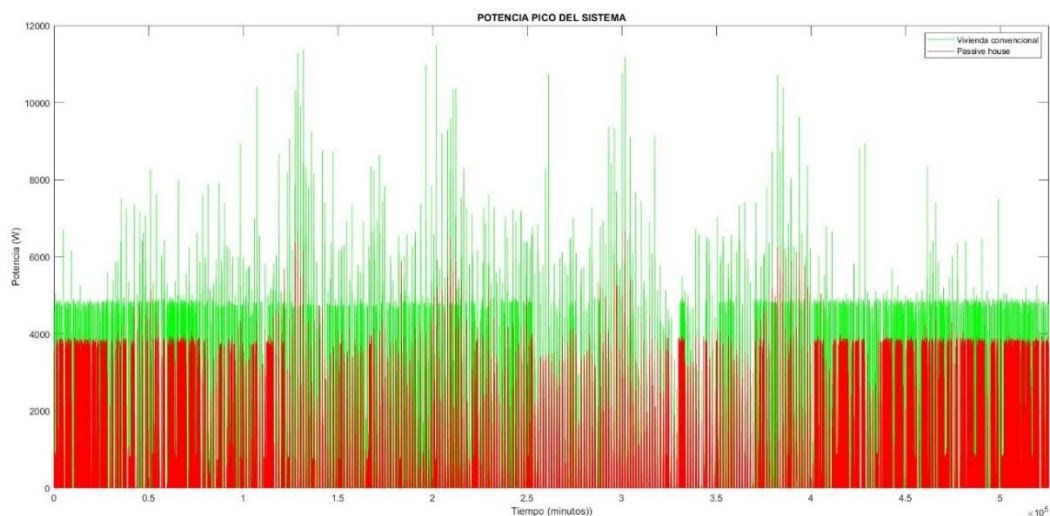


Figura 59: Potencias pico para passive house (rojo) y convencional (verde). Simulink

Los intercambios de potencia con la red eléctrica dan una aproximación de la autonomía del sistema en estudio. En la siguiente figura se muestran en azul los intercambios realizados por la vivienda convencional y en naranja los realizados por la passive house.

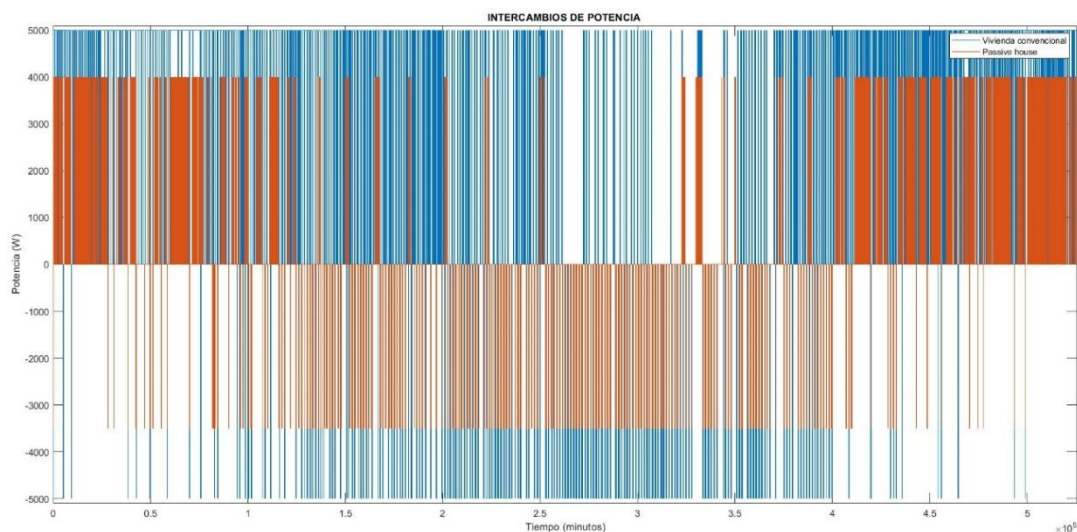


Figura 60: Intercambios de potencia para passive house (en rojo) y convencional (azul). Simulink

Tal y como se han definido los intercambios, la gráfica azul varía entre valores de -5000 W y 5000 W mientras que la naranja oscila entre -3500 W y 4000 W. En cuanto a su distribución, se muestra por una parte una passive house más definida en sus intercambios y unos intercambios en la vivienda convencional más caóticos. La passive house, cuya temperatura durante los meses centrales contadas veces llega al límite de los 19°C, no tiene necesidad de extraer energía de la red, y lo que hace es inyectar la sobrante. La casa convencional en cambio pese a tener periodos de venta de energía, también tiene periodos de necesidad de la conexión a red para poder suplir todas sus necesidades. Por tanto, la proporción de autoconsumo será mucho mayor para el caso de la passive house, mientras que el consumo será claramente mayor para la convencional.

El almacenamiento es uno de los elementos más importantes del sistema y también el que más se ha parametrizado. Como se ha ido viendo en distintos puntos, este sistema cuenta además de con su principal parámetro, la capacidad, con tres límites de funcionamiento dependiendo de los cuales deberá actuar de una manera u otra: Un límite superior a partir del cual inyectar potencia a red, un límite inferior a partir del cual absorber de la red y un último de paro de suministro que deberá evitarse.

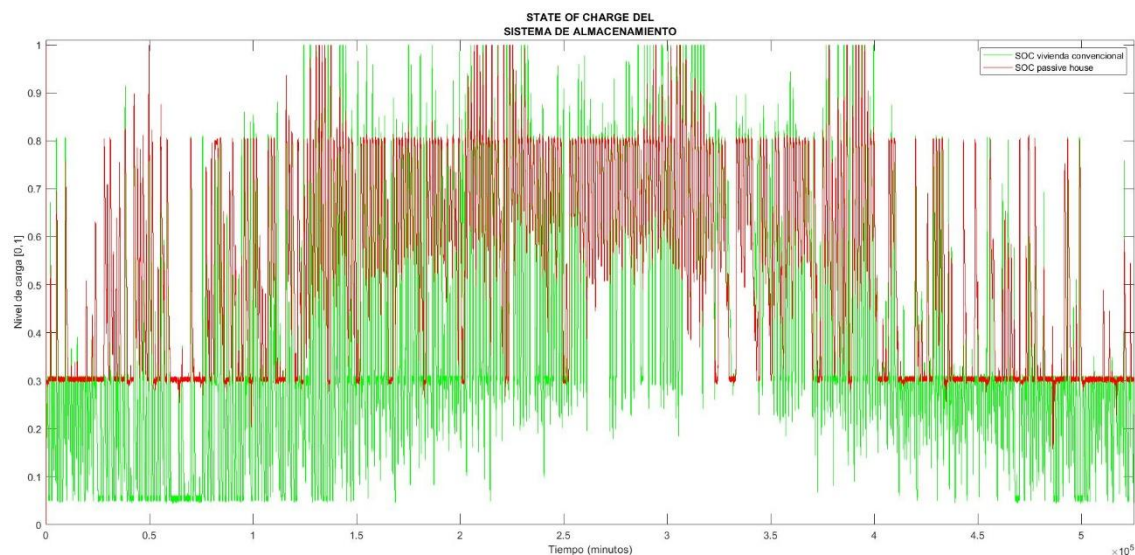


Figura 61: Estado de carga del almacenamiento para passive house (rojo) y convencional (verde). Simulink

Los resultados obtenidos para este estudio sugieren un correcto dimensionamiento para la passive house y uno insuficiente para la vivienda convencional para las exigencias planteadas. El almacenamiento de la passive house muestra claramente el rango de trabajo definido, exceptuando algunos periodos en los que la potencia generada es mayor que la definida para verter a red. La gráfica verde, que representa el estado de carga del almacenamiento de la vivienda convencional, baja por debajo del 30% de su capacidad de manera habitual a excepción de los meses más calurosos, y lo hace llegando hasta el límite del 5%. Esto indica una mala parametrización de la batería para el caso de estudio, ya que como se ha dicho esto no debería suceder. Esta parametrización puede resultar muy compleja de cara a conseguir un adecuado comportamiento durante todo el año.

Visto el comportamiento de los principales elementos del sistema, el análisis de los indicadores restantes será realizado en un ámbito más económico. Ello se llevará a cabo por medio del estudio de diversos consumos anuales y sus precios, comparándolos en última instancia con valores reales actuales.

El primero de ellos será el intercambio energético anual entre el sistema y la red, cuyo valor se utilizará como parte de los costes, en este caso los mensuales.

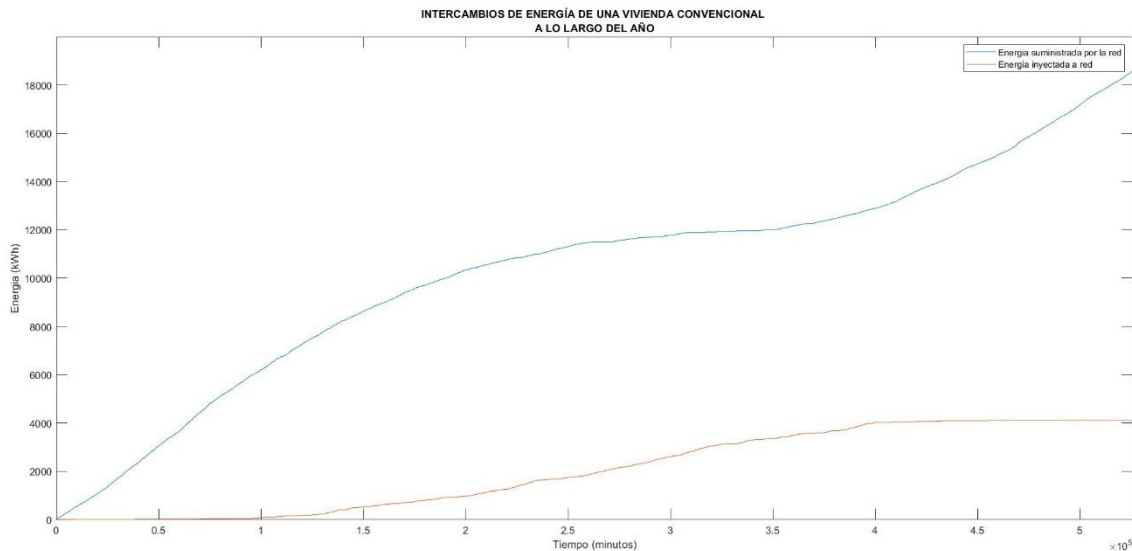


Figura 62: Intercambios de energía con la red. En azul energía consumida, en rojo energía vendida. Simulink

La figura 62 muestra la evolución temporal de la energía absorbida e inyectada a la red en el caso de la vivienda convencional. Tal y como muestra la gráfica, la energía suministrada es ampliamente superior a la inyectada, siendo los periodos más fríos en los que se ha dado un mayor uso de este recurso. Por otro lado, pese a que cabría pensar en un brusco allanamiento del consumo provocado por las elevadas temperaturas alcanzadas en verano, este no para en ningún momento. En cuanto a la potencia inyectada, esta no deja de ser una ganancia menor provocada por tres picos de irradiancia puntuales.

Por tanto, su balance queda de la siguiente manera

$$\text{Ahorro (€)} = 4121 \text{ kWh} \cdot 0,05 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 206,05 \text{ €}$$

Ecuación 20

$$\text{Gasto (€)} = 18578,66 \text{ kWh} \cdot 0,13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 2415,22 \text{ €}$$

Ecuación 21

La figura 63 referente a los intercambios de energía de la passive house muestra resultados totalmente diferentes, pues sitúa la curva de energía inyectada a red por encima de la suministrada desde ella. Su comportamiento es el esperable, inyectando energía a red de manera regular durante los meses de primavera y verano donde el consumo es mínimo y consumiendo una mayor energía de red que, pese a que pueda generar una sensación de mínimo autoconsumo, más tarde se verá como no es así.

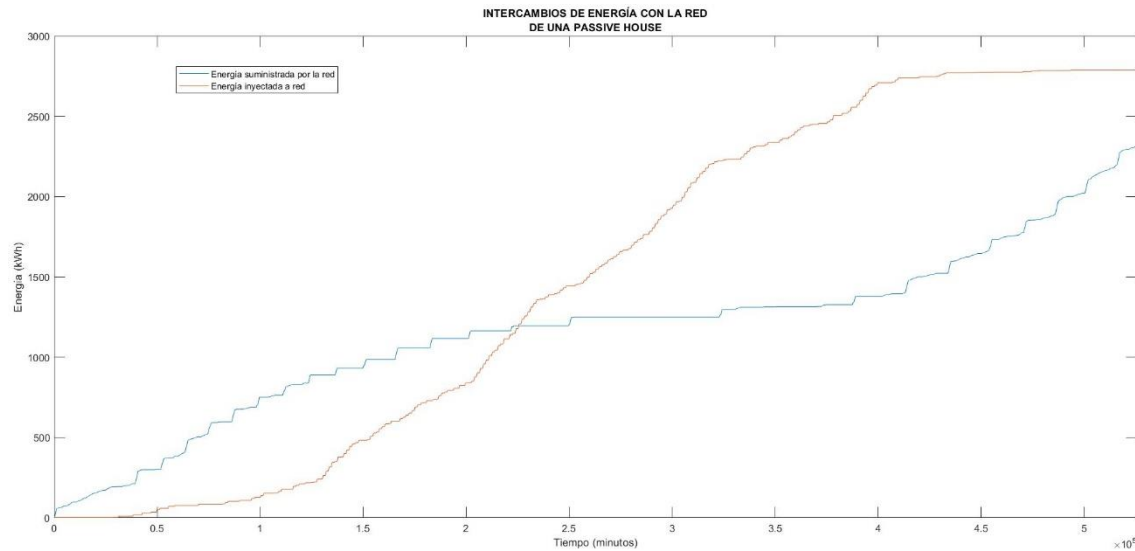


Figura 63: Intercambios de energía con la red. En azul energía consumida, en rojo energía vendida. Simulink

Su balance queda

$$\text{Ahorro (€)} = 2787,1665 \text{ kWh} \cdot 0,05 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 139,35 \text{ €}$$

Ecuación 22

$$\text{Gasto (€)} = 2315,6733 \text{ kWh} \cdot 0,13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 301,03 \text{ €}$$

Ecuación 23

El segundo indicador utilizado será el ratio de autoconsumo, definido como el porcentaje de energía consumida a partir de generación de autoconsumo. Se trata de un indicador muy importante pues describe la penetración de producción renovable del sistema, cada vez más importante en el camino hacia un sistema distribuido.

Las figuras 64 y 65 muestran la energía de red y total consumidas para el caso de una vivienda convencional y pasiva respectivamente, y donde la diferencia entre ambas es de casi 5 veces.

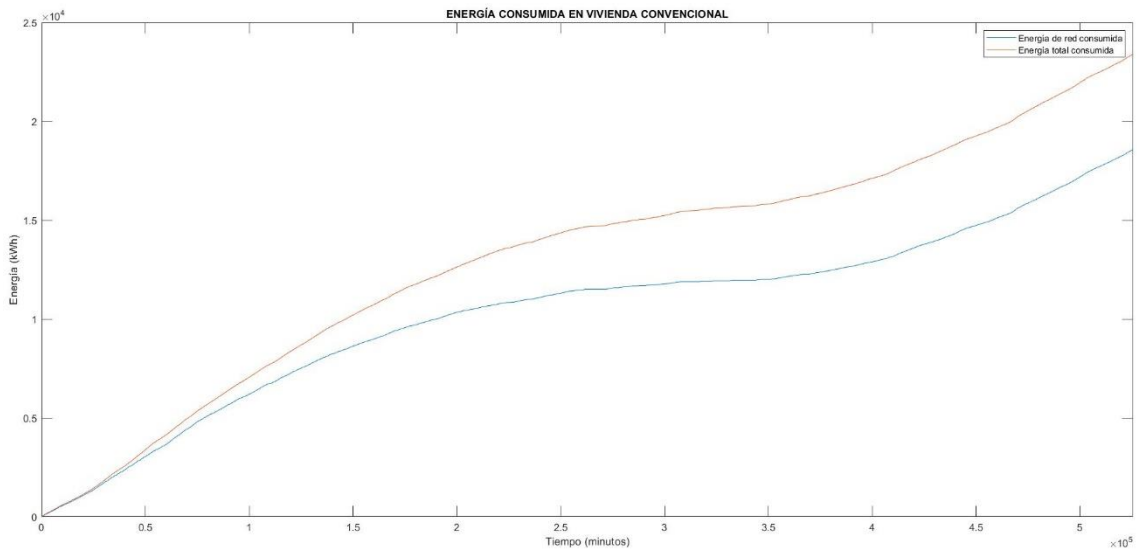


Figura 64: Energía consumida en vivienda convencional. En azul energía de red, en rojo energía total. Simulink

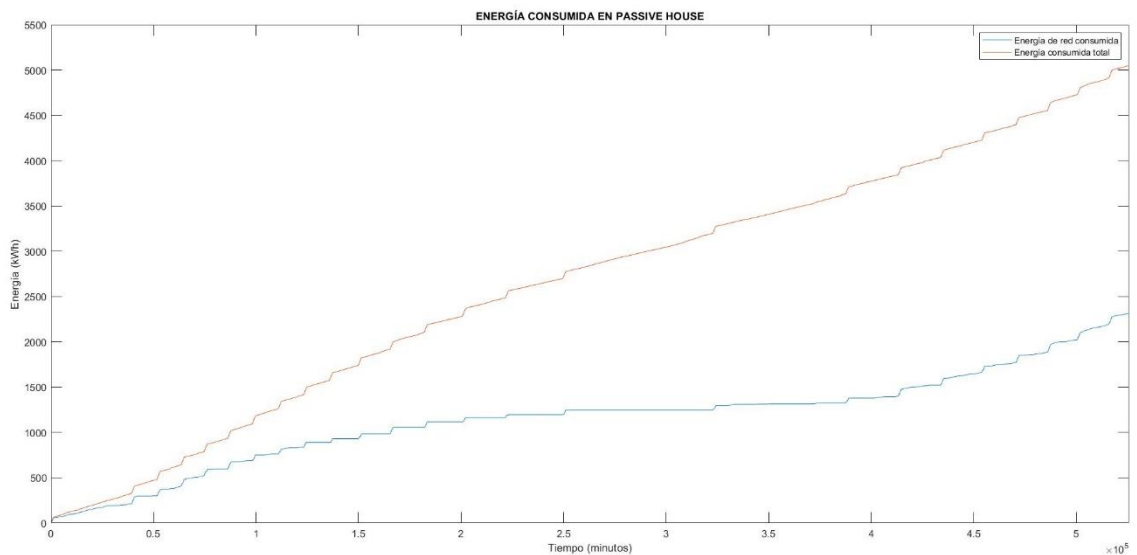


Figura 65: Energía consumida en passive house. En azul energía de red, en rojo energía total. Simulink

Con dichos valores se procede al cálculo del ratio de autoconsumo:

Para la vivienda convencional

$$\text{Ratio de autoconsumo (\%)} = \left(1 - \frac{18578,66 \text{ kWh}}{23402,6 \text{ kWh}}\right) \cdot 100 = 20,61\%$$

Ecuación 24

Para la passive house

$$\text{Ratio de autoconsumo (\%)} = \left(1 - \frac{2315,6733 \text{ kWh}}{5051,407 \text{ kWh}}\right) \cdot 100 = 54,15\%$$

Ecuación 25

Como se ha comprobado, el ratio de autoconsumo es notablemente mayor para la vivienda passive house debido al elevado aislamiento que le permite un menor consumo en invierno y la nula necesidad de suministrar calor al sistema durante los meses cálidos, pudiendo inyectar los excedentes a red. Por tanto, la cuestión reside en llevar a cabo la parametrización que más ganancia te de económicamente, ya que un sistema sobredimensionado puede suponer una inversión cuyas ganancias por excedentes no generen rentabilidad.

El ultimo indicador a tener en cuenta será el consumo de calefacción por metro cuadrado, pues se trata de un indicador muy sencillo de obtener y con el que realizar comparaciones con valores reales.

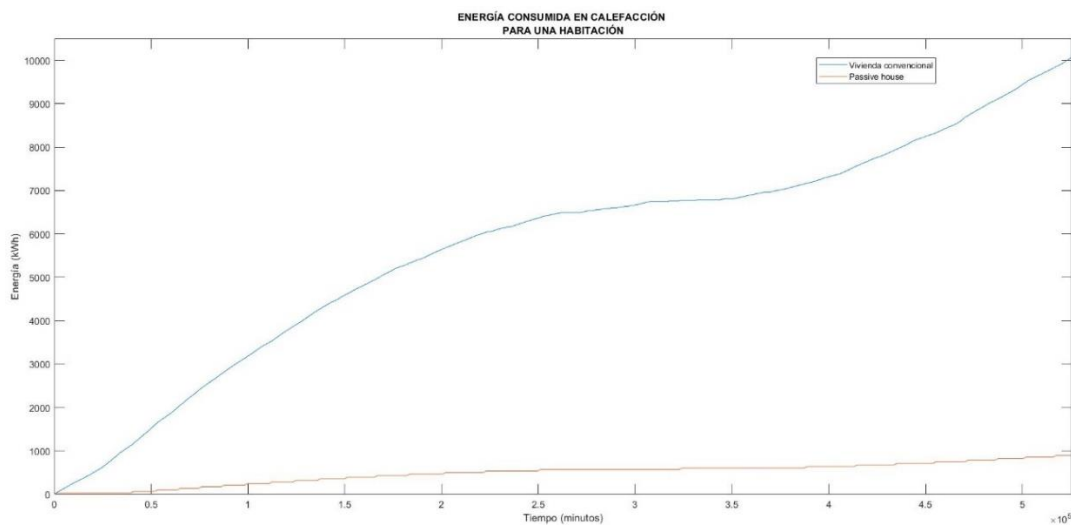


Figura 66: Energía de calefacción consumida por una habitación. En rojo passive house, en azul convencional. Simulink

La gráfica superior muestra la evolución de la energía consumida por el sistema de calefacción para una única habitación, que en el presente estudio consta de 42 m². En ella se observan en azul el consumo para la habitación de una vivienda convencional y en rojo el consumo para una habitación de una passive house, con una diferencia de aproximadamente 10 veces menos. A partir de los valores mostrados, se realiza el cálculo del consumo:

Para una vivienda convencional

$$E = \frac{10069,8 \text{ kWh}}{42 \text{ m}^2} = 239,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Ecuación 26

Para una passive house

$$E = \frac{894,2 \text{ kWh}}{42 \text{ m}^2} = 21,2 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Ecuación 27

obteniendo así un consumo 10 veces mayor para una vivienda convencional en comparación al de una passive house.

6.3. Conclusiones

A continuación se muestra una tabla resumen de los indicadores obtenidos para ambas situaciones:

	Vivienda convencional	Passive house
Temperatura (°C)	19-21	19-21
Sistema fotovoltaico (€)	10000	6000
Almacenamiento (€)	3750	3750
Consumo de red (€/año)	2208,9	161,6
Ratio de autoconsumo (%)	20,61	54,15
Consumo de calefacción m2 (kWh/m ²)	239,8	21,2

Con el estudio de ambas viviendas finalizado, se concluye lo siguiente:

La simulación del comportamiento tanto térmico como energético ha sido satisfactorio para la passive house, no solo por haber logrado mantener la temperatura durante todo el año, sino por haberlo hecho de una manera eficiente y con resultados como el del consumo de calefacción por metro cuadrado, no muy lejos de los 15 kWh/m² exigidos para el certificado de las viviendas passive house. El ratio de autoconsumo obtenido tampoco pasa desapercibido, con un notable 54,15% de su consumo proveniente de la generación fotovoltaica

En lo que a la vivienda convencional se refiere, los resultados distan sensiblemente de los valores reales. El consumo anual total de 23000 kWh es superior a los cerca de 15000 kWh consumidos por una vivienda unifamiliar y aun más en comparación con un edificio de viviendas. Esto puede deberse a diversos factores, entre ellos la mayor eficiencia con la que cuentan las viviendas de hoy en día (recordar que se ha tomado una casa de eficiencia nula) o la cantidad de superficie en contacto con el exterior, algo que tampoco sucede en un bloque de viviendas. Por tanto, los resultados podrían asemejarse a un caso real.

En cuanto a los precios, el presente TFG nunca ha tenido como objetivo la modelización de un sistema eficiente y económico, por lo que los precios asociados al sistema no han sido considerados.

Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras

El presente Trabajo Fin de Grado tenía como objetivo la modelización de un sistema energético de una vivienda compuesto por un modelo de cargas térmicas que simulara la estructura, un sistema eléctrico cuyo método de generación fuera por un lado a través de generación fotovoltaica y por otro lado a través de la red eléctrica y por último las herramientas necesarias para la consecución de una simulación de su comportamiento en los diferentes ámbitos señalados, por lo que puede decirse que el objetivo se ha logrado.

Ha resultado ser un proyecto muy interesante y entretenido de realizar, en gran parte por el método escogido para llevarlo a cabo y por el marco en el que se desarrolla, ya que tiene mucho margen de mejora y potencial de aplicación en un sistema eléctrico cada vez más distribuido.

De cara al futuro de este proyecto, los siguientes pasos deberán consistir por una parte en el perfeccionamiento de diversos aspectos del presente modelo, como pueden ser un control más fino de la potencia de las habitaciones y del sistema de almacenamiento o el desarrollo de una vivienda con mayor número de habitaciones. Por otra parte, el otro gran aspecto a trabajar será el de la implementación del suelo radiante eléctrico, tanto a nivel de modelo como de fabricación.

Capítulo 8: Referencias

- [1] Selectra, «¿Qué suelo radiante es mejor? Tipos, coste de instalación y consumo,» 16/04/2021.
- [2] S. G. Ayechu, *RUNHEAT: Printed underfloor heating*, 2019.
- [3] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor*, México D.F : McGraw-Hill Interamericana, 2004.
- [4] Ministerio de Fomento, «Documento Básico HE Ahorro de energía,» 2019.
- [5] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «CONDICIONES TÉCNICAS DE LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA,» 2020.
- [6] Ministerio de Fomento, «Documento Básico HS Salubridad,» 2019.