

# **ESTUDIO DINÁMICO DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN CON RECUPERACIÓN DE CALOR Y MICROCOGENERACIÓN CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR**

**Autora: Claudia Suárez García, [uo217451@uniovi.es](mailto:uo217451@uniovi.es)**  
**Tutoras: Inés María Suárez Ramón, M<sup>a</sup> Manuela Prieto González**

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

## **RESUMEN**

En la actualidad se están fomentando numerosas Políticas y Directivas para incrementar la eficiencia energética y con ello la sostenibilidad. El objetivo principal de las Políticas de eficiencia energética es reducir o mitigar la cantidad de energía necesaria para proporcionar un determinado producto o servicio: la calefacción o la luz de casa, el movimiento de un vehículo, la construcción de una carretera, etc. Se trata, al fin, de cumplir con los objetivos 2020 de la Unión Europea, es decir, la reducción de un 20% de las emisiones de los gases efecto invernadero, la mejora de un 20% en la eficiencia energética y la producción de un 20% de energía a partir de fuentes renovables [1] y [2].

En España, la transposición de las Directivas Europeas referentes a la eficiencia energética y a la eficiencia del uso final de la energía es importante para poder reducir el creciente consumo y las emisiones que de él se derivan. Dichas medidas se encuentran recogidas en diferentes documentos como el Código Técnico de la Edificación (CTE) [3]. Este documento se trata de un marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad.

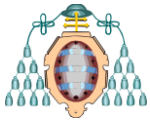
El presente trabajo surge con interés de analizar el uso de las tecnologías actuales que implican un ahorro energético en el sector residencial, concretamente las instalaciones con recuperación de calor y microcogeneración dando respuesta a las Directivas Europeas actuales

referentes a eficiencia energética. Para ello se va a realizar la simulación dinámica de las instalaciones de una vivienda unifamiliar, compuesta por una instalación de ventilación con recuperación de calor y un sistema de microcogeneración para calefacción.

El software escogido ha sido TRNSYS 17, el cual permite simular el comportamiento de las instalaciones térmicas de los edificios bajo unas condiciones climáticas fijadas por el usuario, además de la utilización de variables en el tiempo y la obtención de unos resultados que reflejan el comportamiento de la instalación. Mediante los resultados obtenidos con TRNSYS se puede llegar a la conclusión del correcto diseño de la instalación, además de poder optimizar la misma para lograr la máxima eficiencia posible. Con TRNSYS se pueden realizar estudios paramétricos de comportamiento de las instalaciones para optimizar su diseño en cuanto a eficiencia, consumo de energía, etc.[4]

## **ABSTRACT**

At the present time numerous Policies and Directives are being promoted to increase energy efficiency and sustainability. The main objective of energy efficiency policies is to reduce or mitigate the amount of energy necessary to provide a product or service like heating, light, the movement of a vehicle... This is, at last, to achieve the objectives of the European Union, namely, the reduction of 20% in emissions of greenhouse gases, improving 20% in energy efficiency and producing 20% of energy from renewable sources [1] y [2].



In Spain, the transposition of Europe Directives concerning energy efficiency and energy end-use of energy is important to reduce the increasing consumption and emissions. These measures are contained in different documents as Technical Building Code, CTE [3]. This document is a regulatory framework that established the requirements for buildings in relation to the basic requirements of safety and habitability.

This project arise to analyze the use of current technologies involving energy savings in the residential sector, specifically facilities with heat recovery and cogeneration responding to the current European directives about energy efficiency. For that, it is to do a dynamic simulation installation of a house, composed by a ventilation system with heat recovery system and a microcogeneration for heating.

The software has been chosen TRNSYS 17, which simulates the behavior of thermal installations in buildings under different climatic conditions and the use of variables in time and finally getting results that reflect the behavior of installation. Using the results obtained with TRNSYS can conclude the correct design of the installation, besides being able to optimize it to achieve maximum efficiency. With TRNSYS you can perform parametric studies of performance of facilities to optimize the design for efficiency, energy consumption, etc. [4]

## 1. INTRODUCCIÓN

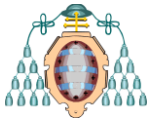
Actualmente, la energía que alimenta el mundo se obtiene principalmente de la combustión de combustibles fósiles como el gas, el petróleo y el carbón o de la fisión nuclear. No obstante, en algunos países del mundo como Suecia, Alemania, Dinamarca, España o EE.UU., el avance de las energías renovables es muy relevante.

La transición total desde las energías fósiles hasta las alternativas y renovables llevará décadas todavía, debido a las reservas de petróleo y gas existentes. Hasta ese momento:

- La energía eólica continúa creciendo considerablemente.
- La infraestructura para la energía solar es cada vez más barata.
- Las bombas de calor geotérmicas son mucho más eficientes.
- El desarrollo de los biocombustibles a nivel comercial fomenta el desarrollo de motores más verdes para coches y camiones.
- La fusión nuclear sigue su lento crecimiento, tratándose todavía de una tecnología sin desarrollar con al menos otros 20-30 años de investigación necesaria.
- Las políticas de eficiencia energética son cada vez más activas, si bien se hace todavía necesario el fomento de éstas.

En la actualidad existen factores determinantes a la hora del estudio y utilización de fuentes de energía alternativas. Entre ellos destacan:

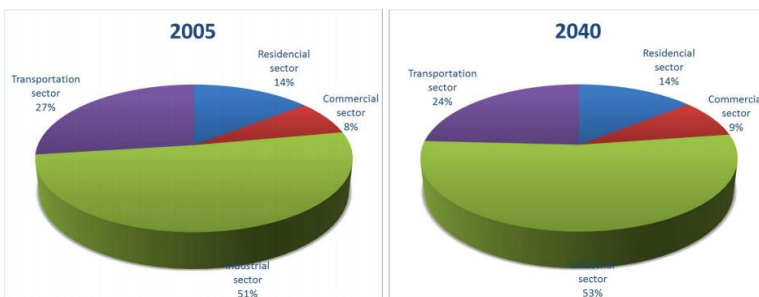
- **Suficiencia:** La existencia de reservas energéticas es de vital importancia en un mundo que depende de fuentes de energía no renovables. En el caso de la Unión Europea posee menos del 0,5% de las reservas mundiales de petróleo y menos del 1% de las reservas de gas.
- **Seguridad:** La seguridad en el suministro de la energía tiene una importancia relevante ya que la mayoría de los países



del mundo no son productores y, por tanto, dependen de la fiabilidad de su transporte.

- **Coste y competitividad:** El consumo de energía mundial se estima que crecerá un 56% entre los años 2010 y 2040. China e India (y otros países como México o Brasil en menor medida) serán protagonistas de este incremento de consumo, comprando a los mismos proveedores y aumentando con ello los precios. (Fuentes: U.S. Energy Information Administration - International Energy Outlook 2013).
- **Sostenibilidad:** El aumento del uso de energías renovables y las políticas de eficiencia energética reducirán las emisiones de CO<sub>2</sub> y el calentamiento global.

Respecto a los consumos a nivel mundial pueden representarse por sectores, como en la figura 1 donde se comparan los consumos en el año 2005 frente a las estimaciones de consumo del año 2040.

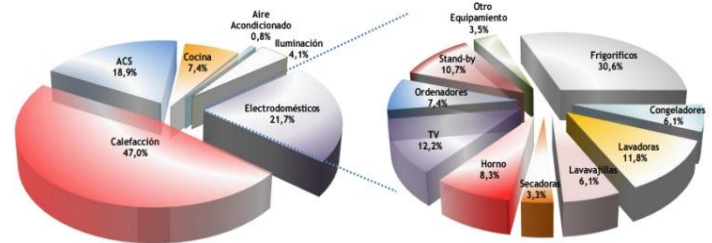


\*\* Sources: U.S. Energy Information Administration - International Energy Outlook 2013.

**Figura 1. Comparación de la estructura de consumos entre el año 2005 y las estimaciones del año 2040 a nivel mundial**

En la figura 1 puede apreciarse cómo el sector residencial registra el 14 % del consumo mundial colocándose en el tercer puesto por detrás de la industria y el transporte [2]. Los consumos del sector residencial en España se representan en la figura 2, en la cual se aprecia cómo la calefacción es el servicio de mayor consumo (47%), seguido por el consumo de electrodomésticos (21,7 %) y la producción de agua caliente sanitaria (ACS)(18,9%)[5].

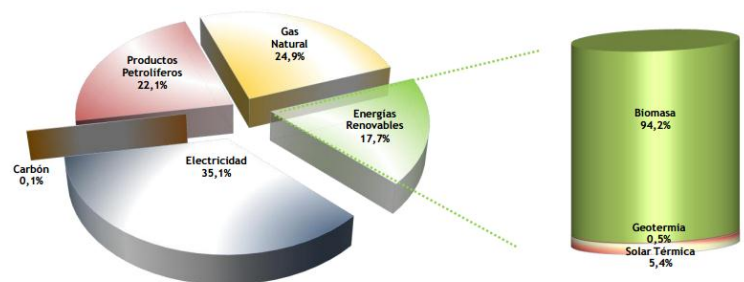
**Estructura de Consumo según Usos Energéticos**



**Figura 2. Estructura de Consumos según Usos Energéticos del Sector Residencial en España.** (Fuente: Proyecto "Sech-Spahousec. Análisis del consumo energético del sector residencial en España" realizado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE))

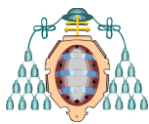
En cuanto a las fuentes energéticas utilizadas en España y que se encuentran representadas en la figura 3, el estudio refleja que la principal es la electricidad (35,1%), seguida del gas natural (24,9%), junto a los derivados del petróleo (22,1%), y tras ellas las energías renovables (17,7%)[5].

**Estructura de Consumo según Fuentes Energéticas**



**Figura 3. Estructura del Consumo según Fuentes Energéticas en España.** (Fuente: Proyecto "Sech-Spahousec. Análisis del consumo energético del sector residencial en España" realizado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE))

Con todo lo descrito anteriormente, es necesario buscar una alternativa que permita el uso de energías alternativas o instalaciones más eficientes para los hogares, especialmente en lo referente al consumo de calefacción, electricidad y ACS. Entre las alternativas más adecuadas para el sector residencial y con mayor potencial de ahorro energético se encuentra la cogeneración de calor y electricidad y la recuperación de calor en la ventilación



## 1.1 La cogeneración

La cogeneración se define como la generación simultánea en un proceso, de energía térmica útil (calor útil) y eléctrica y/o mecánica. Se trata de un modo muy eficiente de conversión de la energía. Su uso tiene impactos positivos en la economía, el medio ambiente, el uso responsable de los recursos y la seguridad del suministro energético.

Aunque inicialmente se orientó hacia la industria donde tuvo su gran auge, no es sólo una alternativa válida para ella. Las pequeñas empresas, edificios públicos, incluso los propietarios de viviendas unifamiliares pueden utilizar esta tecnología y aprovechar sus beneficios. La situación más común de un edificio es la necesidad de energía eléctrica y calor, mientras por otro lado, otro factor relevante es la reducida eficiencia de las instalaciones existentes.

En la tabla 1 se recogen algunas ventajas e inconvenientes del uso de esta tecnología, en donde destacan principalmente el ahorro de energía y la reducción de la dependencia energética exterior como ventajas [6].

**Tabla 1 . Ventajas y desventajas de la cogeneración**

<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
-Ahorro de energía primaria	-Riesgo por cambio de normativa vigente
- Reducción de la dependencia energética exterior	- Incertidumbre en la política de precios energéticos
- Mejora del medio ambiente	-Riesgo financiero de la inversión
- Diversificación de fuentes energéticas	-Aumento de la contaminación local
- Disminución de pérdidas en transporte y distribución	-Aumento de la contaminación local
-Ahorro en la factura energética global para el usuario	-Mayor complejidad técnica en la producción energética

En la actualidad el principal problema de la cogeneración en España son los numerosos Reales Decretos y Leyes que se han publicado y no han favorecido al desarrollo de la cogeneración.

Además otro aspecto que ha ralentizado el desarrollo de esta tecnología ha sido el auge también de otras energías alternativas.

La cogeneración en el sector residencial tiene un alto potencial que no se encuentra explotado. Según IDAE el sector residencial y terciario acaparan el 98% de la disponibilidad frente a una potencia instalada de 175 MWe de 6.212 MWe totales instalados [7].

Además la cogeneración cuenta con la posibilidad de aportar ACS, calefacción, climatización de piscinas cubiertas y aire acondicionado con un mínimo espacio ocupado para el conjunto de equipos, además de una fácil integración de cualquier tecnología existente de generación y distribución de calor.

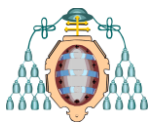
### 1.1.1 Tecnologías existentes

La gama de tecnologías disponibles es bastante amplia. Debe elegirse la tecnología de cogeneración conforme a algunos criterios específicos a su actividad y a la demanda de calor.

Entre las principales tecnologías desarrolladas se encuentran: la cogeneración con turbina de vapor, cuya potencia es muy elevada y por lo tanto apropiada para la industria; por otro lado también se usan las turbinas de gas, las cuales se han convertido en la tecnología más extendida en cogeneración en los últimos años adaptándose tanto al ámbito industrial como microcogeneración. Finalmente, otra tecnología implantada es el motor alternativo de combustión interna el cual destaca por su elevada relación electricidad-calor.

En cuanto al sector residencial y atendiendo a la demanda exigida por esta clase de edificios destaca el uso de microturbinas de gas y motores alternativos de combustión. El uso de turbinas de vapor se descarta de antemano debido a las altas potencias que manejan dichos equipos haciéndolos inviables en el sector residencial.

En concreto, en viviendas unifamiliares se está produciendo una expansión del uso del motor alternativo de combustión interna. Ésto es debido principalmente por los rangos de potencia que



manejan lo que permite una fácil adaptación a este tipo de edificios. Además son equipos muy adaptables a las variaciones de demanda al permitir la regulación de carga.

Como se ha mencionado anteriormente debido a la elevada relación electricidad/calor se ha elegido para el presente trabajo un motor alternativo de combustión interna, el cuál proporcionará, en primer lugar, electricidad a la vivienda, y en segundo lugar, el calor que se aprovechará para calentar el agua circulante por los radiadores, satisfaciendo de este modo la demanda de calefacción.

## 1.2 La recuperación de calor

La ventilación con recuperación de calor se trata de una instalación en la cual dos flujos de aire se enfrentan a contracorriente para producir la transmisión de temperatura y humedad entre ambas, como si se tratara de una especie de intercambiador. Estas dos corrientes son, en primer lugar, aire fresco procedente del exterior el cual será precalentado antes de introducirlo en el interior de la vivienda, y por otro lado una corriente extraída del interior. Esto permite ahorrar energía de calefacción en valores estimados entre el 15% y 30% [9], dependiendo de la calidad de las ventanas y puertas respecto a su permeabilidad al aire.

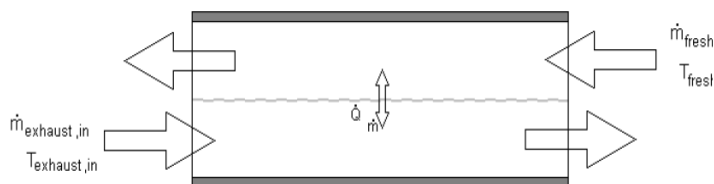


Figura 4. Esquema de funcionamiento de un recuperador de calor

Los recuperadores de calor son dispositivos que pueden instalarse y operar de manera independiente, o contruidos al efecto, o adosados a sistemas de climatización existentes. En cualquier caso, estos dispositivos llevan asociado no sólo un ahorro de energía, sino también una reducción de los requerimientos de potencia térmica instalada, con importantes decrementos

en el elevado coste de algunas instalaciones de generación térmica (geotermia, solar, biomasa...) haciendo éstas económicamente más asequibles.

Existen numerosos tipos de recuperadores de calor, desde intercambiadores de calor aire-aire, flujo paralelo o flujo cruzado hasta dispositivos más complejos con sistemas by-pass incorporado que es regulado por las condiciones de los flujos a la entrada.

En el presente trabajo debido a las altas eficiencias exigidas para lograr un mayor ahorro energético se ha decidido instalar un recuperador de calor de flujo cruzado en el que se realizará una transmisión de calor sensible y latente.

## 2. DATOS DE PARTIDA

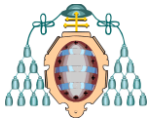
En cuanto a los diferentes datos que intervienen en las necesidades energéticas se encuentran:

- Localización del edificio (orientación, latitud, altitud).
- Condiciones meteorológicas.
- Transferencia de calor y características de los cerramientos de la vivienda.
- Huecos (ventanas, puertas y otros huecos).
- Dimensiones del edificio.
- Cargas internas por ocupación, iluminación y equipos.
- Infiltraciones y ventilación de aire.
- Calefacción y refrigeración.

A continuación se va profundizar en cada uno de ellos detallando sus valores.

### 2.1 Descripción de la vivienda

La vivienda unifamiliar objeto de estudio en este proyecto se encuentra situada en la ciudad de Gijón con una orientación indica en el plano de cada una de las zonas consideradas. Cuenta con un área total de 430,28 m<sup>2</sup> que se encuentra dividida en tres zonas térmicas: Sótano, Planta



Baja y Buhardilla. En las figuras 5-7 se muestran el esquema de las 3 zonas principales de la vivienda mencionadas anteriormente.

En el presente trabajo sólo se van a analizar la Planta Baja y la Buhardilla puesto que son las zonas calefactadas pero es necesario definir la zona Sótano ya que establece las condiciones de contorno necesarias para la simulación.

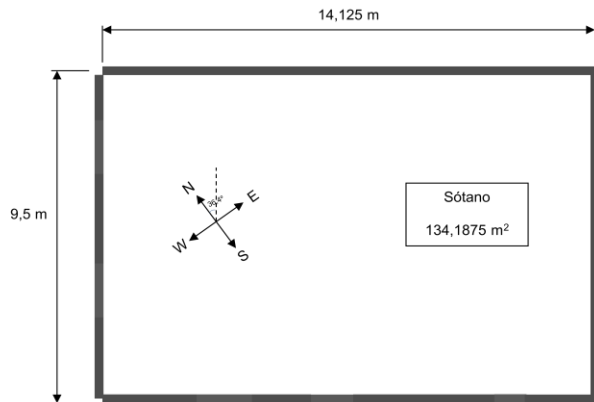


Figura 5. Esquema de la planta del sótano (dimensiones exteriores)

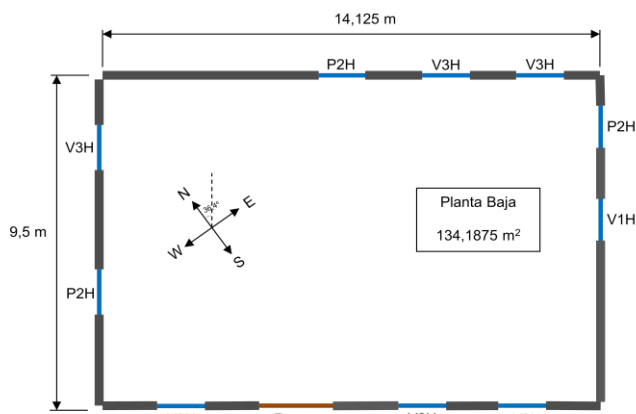


Figura 6. Esquema de la planta de la planta baja (V1H: Ventana 1 Hoja; V2H: Ventana 2 Hojas; V3H: Ventana 3 Hojas; P2H: Puerta 2 Hojas) (dimensiones exteriores)

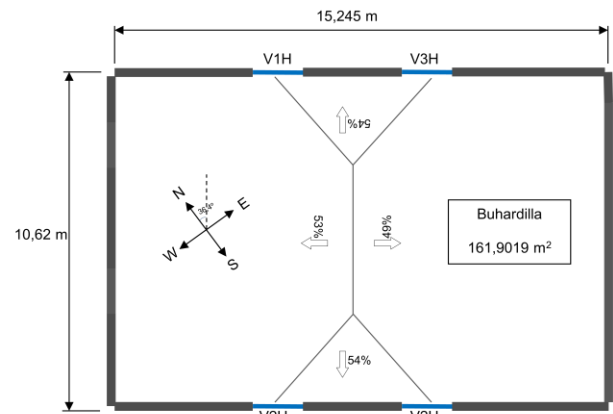


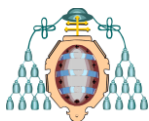
Figura 7. Esquema de la planta de la buhardilla (V1H: Ventana 1 Hoja; V2H: Ventana 2 Hojas; V3H: Ventana 3 Hojas) (dimensiones exteriores)

## 2.2. Datos climatológicos

Los datos meteorológicos han sido fijados a partir de la localización de la vivienda. Entre ellos destacan la temperatura ambiente y la humedad.

La importancia de la meteorología en el comportamiento térmico de un edificio es de una importancia capital. Normalmente los programas de simulación utilizan información meteorológica incluida en archivos de distintos formatos. En este caso concreto, TRNSYS trabaja con datos hora a hora de diversos parámetros climáticos incluidos en un archivo TMY (Typical Meteorological Year).

Un año meteorológico típico es una compilación de valores de temperatura ambiental y de otros datos meteorológicos de un período de un año y seleccionados para una ubicación específica. Esta colección de datos consiste en meses seleccionados de distintos años que se concatenan para formar un año completo. El TMY establece un estándar para los datos meteorológicos, permitiendo comparaciones de distintos tipos de sistemas. Debe recalarse que el TMY no es necesariamente un buen indicador de las condiciones meteorológicas de un año concreto, o incluso de periodos de tiempo tales como 30 años. Los TMY son generados a partir de datos recogidos en diferentes estaciones meteorológicas.



En la actualidad los TMY han sido sustituidos por los TMY2 y estos pronto lo serán por los TMY3. Básicamente estas actualizaciones incluyen revisiones de datos como nuevos datos para mejorar la precisión. La versión actual de TRNSYS utiliza TMY2.

En la base de datos originales de TRNSYS 17 los TMY2 disponibles para regiones europeas son generados por el software meteonorm, perteneciente a la compañía Meteotest. Aunque entre los archivos no se encuentra el TMY2 de Gijón, este ha podido generarse con el software meteonorm, interpolando los datos a partir de las estaciones meteorológicas existentes más cercanas.

### 2.3 Cerramientos

Existen cinco tipos de cerramientos en el edificio (muro perimetral sótano, paredes exteriores, forjado sótano-planta baja, forjado planta baja-buhardilla y cubierta) compuestos por varias capas de diferentes materiales.

Estos materiales han sido seleccionados de acuerdo con los materiales más representativos en construcción teniendo en cuenta la localización de la vivienda. En la tabla 2 se recogen los diferentes materiales y las propiedades termofísicas de los mismos.

**Tabla 2. Propiedades Termo físicas de los materiales de los cerramientos**

Tipo de cerramiento	Materiales (del interior al exterior)	Espesor (m)	k (W/m K)	c <sub>p</sub> (J/kg K)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	R (m <sup>2</sup> K/W)
Muro perimetral sótano	Hormigón armado	0.400	1.63	1000	2200	-
Pared exterior	Enlucido de yeso	0.015	0.28	900	1166	-
	Machetón	0.060	0.405	1080	921	-
	Aislante XPS	0.040	0.034	800	29	-
	Cámara de aire	0.025	-	-	-	0.172
	Termoarcilla	0.140	0.405	1800	969	-
	Mortero de cemento	0.015	1	1000	1700	-
Forjado sótano-planta baja	Madera	0.015	0.15	1600	480	-
	Mortero de cemento	0.015	1	1000	1700	-
	Forjado	0.250	1.323	1000	1330	-
	Aislante XPS	0.040	0.034	800	29	-
Forjado planta baja-buhardilla	Madera	0.015	0.15	1600	480	-
	Mortero de cemento	0.015	1	1000	1700	-
	Forjado	0.250	1.323	1000	1330	-
	Aislante XPS	0.040	0.034	800	29	-
	Enlucido de yeso	0.015	0.28	900	1166	-
Cubierta	Mortero de cemento	0.015	1	1000	1700	-
	Forjado	0.250	1.323	1000	1330	-
	Barrera antivapor	0.002	0.2	1000	1200	-
	Aislante XPS	0.080	0.034	800	29	-
	Capa de sellado	0.002	0.2	1000	1200	-
	Capa impermeabilizante	0.002	0.2	1000	1200	-
	Capa de sellado	0.002	0.2	1000	1200	-
	Pizarra	0.005	0.18	760	2750	-

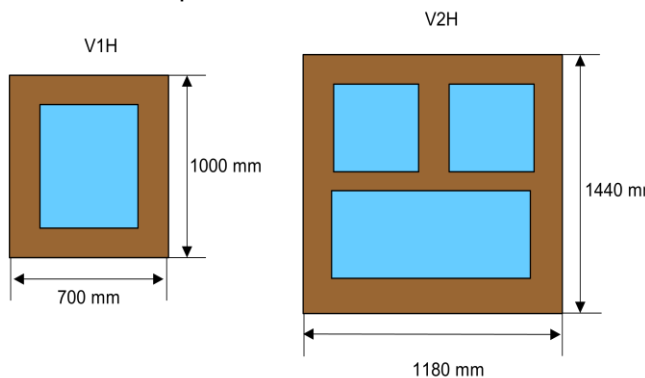
## 2.4 Huecos y ventanas

La vivienda cuenta con diferentes tipos de huecos clasificados principalmente en ventanas y puertas. Ninguno de esos huecos cuenta con ningún elemento de sombra que le afecte.

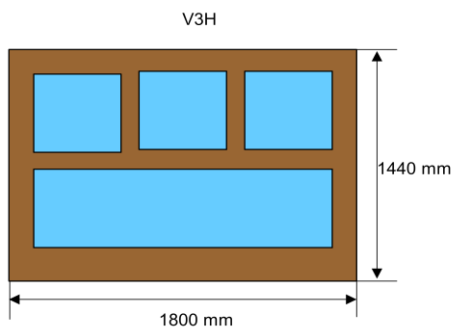
En cuanto a los materiales de los mismos se ha elegido para las ventas y la puerta acristalada un cristal de doble vidrio de baja emisividad 4/6/4 y un marco de PVC. Por otro lado la puerta de acceso a la vivienda es una puerta opaca de madera cuyas propiedades coinciden con las recogidas en la tabla 2.

A continuación en las figuras 8-10 se representa el alzado de los diferentes tipos de ventanas y puertas.

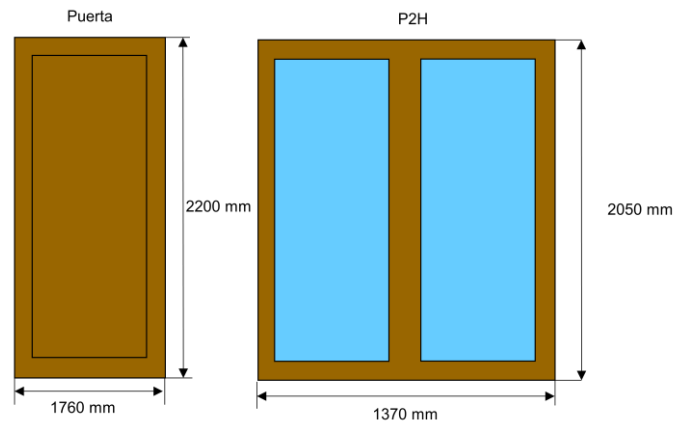
Finalmente en la tabla 3 se recogen las características representativas de estos huecos.



**Figura 8. Esquema de las ventanas: V1H: Ventana 1 Hoja; V2H: Ventana 2 Hojas**



**Figura 9. Esquema de la ventana V3H: Ventana 3 Hojas**



**Figura 10. Esquema de la puerta y P2H: Puerta 2 Hojas**

**Tabla 3. Características y propiedades de los huecos de la vivienda**

Código	Descripción	Área (m <sup>2</sup> )	% Marco
V1H	Ventana 1 Hoja	0,7	50
V2H	Ventana 2 Hojas	1,7	38
V3H	Ventana 3 Hojas	2,6	38
P2H	Puerta 2 Hojas	2,8	38

Puerta de Madera			
Espesor (cm)	Área (m <sup>2</sup> )	Ancho (m)	Altura (m)
3	3,87	1,76	2,2

Parámetros característicos		
<b>Cristal</b>	Coficiente global de transmisión de calor(W/m <sup>2</sup> K)	3,44
	Factor de ganancia solar	0,76
<b>Marco</b>	Coficiente global de transmisión de calor(W/m <sup>2</sup> K)	2,3

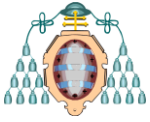
	V1H	V2H,V3H,P2H
<b>Coficiente global de transmisión de calor(W/m<sup>2</sup> K)</b>	2,87	3

## 2.5 Cargas internas por ocupación

La ocupación de la vivienda y las cargas internas por ocupantes se han definido de acuerdo con el Perfil de Uso Residencial del CTE y los rangos horarios definidos en los diferentes días laborales y festivos.

Teniendo en cuenta que las superficies útiles de la Planta Baja y la Buhardilla son de 115.93 y 119.7 m<sup>2</sup>, respectivamente, y que según la norma ISO 7730 una persona sentada en reposo emite 60 W sensibles y 40 W latentes, se obtienen las personas equivalentes a las cargas de ocupación.





En la tabla 4 se recogen los valores considerados a partir del Código Técnico de la Edificación.

## 2.6 Cargas internas por iluminación y por equipos

Las cargas internas por iluminación y por equipos que se encuentran en el interior de la vivienda se han definido de acuerdo con el Perfil de Uso Residencial del CTE según el rango horario. Los valores de estas cargas internas se encuentran recogidos en la tabla 4.

## 2.7 Infiltraciones y ventilaciones de aire

En cuanto a los caudales de ventilación necesarios, se han tenido en cuenta los dos periodos representativos del año: invierno y verano y se han extraído sus valores del Perfil de Uso del Código Técnico de la Edificación.

En cuanto a las infiltraciones, se ha considerado un valor tendiendo a conservador de 1 renovación/hora en la Planta Baja y 1 renovación/hora en la Buhardilla.

Teniendo esto en cuenta y recurriendo al Código Técnico de la Edificación, en concreto al Documento HS3, el cual especifica los caudales necesarios a introducir con cada renovación de aire y el número de ocupantes de cada una de las zonas, se obtiene el perfil de ventilación de aire necesario para la vivienda.

## 3.7 Calefacción y refrigeración

Finalmente, los sistemas de calefacción y refrigeración se activan y desactivan en la vivienda de acuerdo con las temperaturas de consigna especificadas en el Perfil de Uso Residencial del CTE según la hora del día y el mes del año, como se representa en la figura 11.

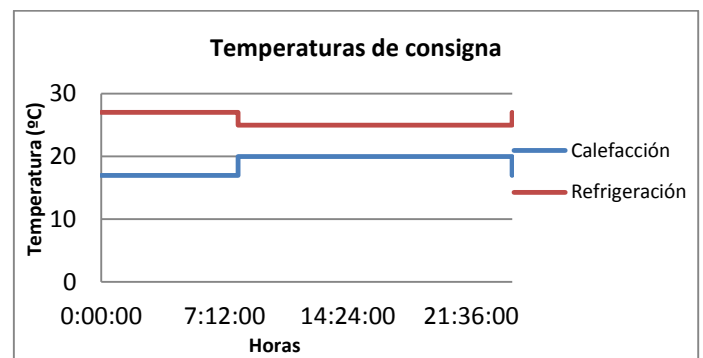
El sistema de calefacción se activa/desactiva en la Planta Baja y en la Buhardilla para lograr unas condiciones de confort comprendidas entre 20°C y 17°C según horario.

En cuanto a las simulaciones y obtención de resultados se ha dividido el año en dos periodos

principales que determinan el funcionamiento de cada instalación:

- Refrigeración ON / Verano (Junio-Septiembre)
- Calefacción ON / Invierno (Octubre-Mayo)

El caso de verano se ha decidido no analizar puesto que las cargas térmicas necesarias son muy pequeñas con respecto a las demandadas en verano por lo que el presente trabajo se centra en el sistema de calefacción durante los meses de Octubre a Mayo.



**Figura 11. Temperaturas de control de los sistemas de calefacción y refrigeración**

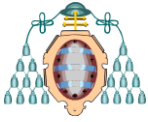


Tabla 4. Resumen de las cargas internas de la vivienda

Cargas internas por ocupación					
	1h-7h	8h	9h-15h	16h-23h	24h
<b>Sensible Laborable (<math>W/m^2</math>)</b>	2,15	0,54	0,54	1,08	2,15
<b>Sensible Festivo (<math>W/m^2</math>)</b>	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
<b>Latente laborable (<math>W/m^2</math>)</b>	1,36	0,34	0,34	0,68	1,36
<b>Latente festivo (<math>W/m^2</math>)</b>	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Cargas internas por iluminación					
<b>Carga interna (<math>W/m^2</math>)</b>	0,44	1,32	1,32	1,32	2,20
Cargas internas por equipos					
<b>Carga interna (<math>W/m^2</math>)</b>	0,44	1,32	1,32	1,32	2,20

### 3. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

La instalación completa está dividida en dos sistemas: ventilación y calefacción. Una vez que se ha diseñado la instalación y se han seleccionado los diferentes equipos que la forman, se procederá a su simulación con el software TRNSYS 17.

#### 3.1 Instalación de ventilación

La instalación de ventilación está destinada a la renovación del aire de los locales o viviendas para limitar el deterioro de la calidad del aire. El principio básico de un sistema de ventilación consiste en alimentar de aire exterior a las viviendas generalmente ocupadas por personas, y, a su vez, evacuar hacia el exterior el aire de peor calidad procedente de las mismas.

Una instalación de ventilación debe cumplir los siguientes requisitos:

- Calidad el aire interior
- Confort acústico: la normativa obligatoria establece una serie de condiciones para las conducciones y equipamiento de la ventilación, encaminadas a prevenir la transmisión de ruidos y vibraciones al edificio. El sistema de ventilación puede afectar al aislamiento al ruido exterior o ruido del edificio o de la propia vivienda.
- Confort térmico y ahorro energético: debe estar diseñada para garantizar las condiciones de confort establecidas por normativa.
- Seguridad en caso de incendio
- Uso sostenible de los recursos naturales
- Durabilidad y mantenimiento

En el presente trabajo la instalación de ventilación dispondrá además de un recuperador de calor cuya finalidad es elevar la temperatura

y disminuir la humedad contenida en la corriente procedente del exterior.

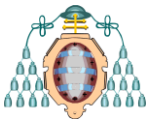
El núcleo de la instalación de ventilación será, por lo tanto, el recuperador de calor. Para ello se ha elegido el recuperador de calor de la marca comercial Zehnder en concreto. Teniendo en cuenta las renovaciones de aire necesarias para garantizar unas condiciones de confort en el interior de la vivienda se ha seleccionado el modelo Zehnder ConfoAir 550 cuyas características técnicas se recogen en la tabla 6:

Tabla 6. Características técnicas del recuperador de calor Zehnder ConfoAir 550

Zehnder ConfoAir 550	
Caudal mínimo ( $m^3/h$ )	50
Caudal máximo ( $m^3/h$ )	500
Rendimiento sensible	90%
Rendimiento latente	65%
Permite regulación de carga	Si
Potencia máxima absorbida (W)	350
Nivel sonoro (dB(A))	Aire impulsado: 79 Aire extraído: 63

#### 3.2 Instalación de calefacción

Tomando como dato la carga térmica máxima demandada por la vivienda se ha establecido la carga de diseño necesaria, la cual se ha fijado como el 70% de la carga máxima necesaria en cada uno de los dos períodos del año en los que se ha dividido la simulación, refrigeración y calefacción. En la tabla 7 se recogen los valores de esas cargas máximas y de las cargas de diseño escogidas. Estas últimas deben ser capaces de satisfacer la demanda el 97,5% de las horas totales de funcionamiento.



**Tabla 7. Cargas sensible máxima y de diseño de la vivienda**

Carga sensible máxima (kW)	Cargas de diseño (kW)		TOTAL		
	Planta	Buhard.	Planta	Buhard.	TOTAL
<b>Calefacción</b>	7,750	7,392	5,425	5,174	10,59
<b>Refrigeración</b>	1,922	0,000	1,345	0,000	1,345

En la tabla anterior se justifica lo anteriormente citado sobre el periodo de refrigeración, el cual no va a ser analizado en este trabajo ya que las cargas máximas durante este periodo son muy pequeñas llegando a ser nulas en la Buhardilla frente a las necesarias durante el período de calefacción.

A partir de las cargas de diseño se procede a la selección de los radiadores que proporcionarán esos valores junto con el motor alternativo de combustión interna. Para comenzar con los radiadores se ha decidido instalar como punto de partida un único equipo en cada una de las zonas de la vivienda, Planta y Buhardilla, teniendo en cuenta y considerando la carga necesaria en cada una de ellas igual al 70% de la máxima en cada zona respectivamente.

De este modo se han elegido los radiadores de baja temperatura del fabricante Jaga, en concreto el modelo Tempo, principalmente por su tecnología Low-H2O que incluye un intercambiador de calor superconductor y ultrarápido para mínimo consumo de energía y máxima emisión de calor, además de un sistema DBE (Dynamic Boost Effect) para el manejo de muy bajas temperaturas de agua, desde 30°C. Las características de los dos equipos elegidos para la Planta y la Buhardilla se muestran en la tabla 8:

**Tabla 8. Características técnicas de los radiadores Jaga escogidos**

<b>Zona Planta</b>	
Modelo	<b>TEMW.090.200.21.101/DBE</b>
Longitud (cm)	200
Potencia máxima (W)	5676
Temperaturas: 55°C/45°C)(W)	
Potencia (Temperaturas: 45°C/40°C)(W)	4257
Potencia (Temperaturas: 38°C/33°C)(W)	2933
Caudal másico agua interior(kg/s)	0.135
<b>Zona Buhardilla</b>	
Modelo	<b>TEMW.090.180.21.101/DBE</b>
Longitud (cm)	180

Potencia máxima (W)	
Temperaturas: 55°C/45°C)(W)	5224
Potencia (Temperaturas: 45°C/40°C)(W)	3918
Potencia (Temperaturas: 38°C/33°C)(W)	2699
Caudal másico agua interior(kg/s)	0.125

El calor necesario para satisfacer las necesidades térmicas de la vivienda va a proceder del motor alternativo de combustión interna. Dicho motor de combustión tendrá como finalidad principal la aportación del calor demandado en la instalación e indirectamente proporcionará electricidad logrando de este modo la cogeneración.

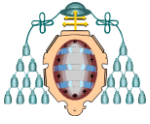
Para la elección del motor se ha partido de la carga de diseño total, es decir, la potencia necesaria para lograr unas condiciones de confort tanto en la Planta como en la Buhardilla.

El motor escogido para esta instalación es el modelo CP5WE de la marca Yanmar. Se trata de un motor en el que se va a utilizar gas natural como combustible y es capaz de proporcionar una potencia térmica de 9,7 kW y una potencia eléctrica de 5 kW. Como puede apreciarse, la potencia nominal es menor a la potencia de diseño calculada. Esto es debido a que el número de horas en el que se satisface la demanda es mucho mayor que el 97,5 %, pudiéndose reducir de este modo esa potencia necesaria. Además, otro criterio relevante a la hora de la elección ha sido el elevado intervalo de mantenimiento especificado por el fabricante, debido principalmente a un diseño muy ajustado.

En la tabla 9 se recogen las características técnicas del mismo:

**Tabla 9. Características técnicas del motor alternativo de combustión interna Yanmar CP5WE.**

<b>Motor CP5WE</b>	
Potencia térmica (kW)	9,7
Potencia eléctrica (kW)	5
Eficiencia global (%)	85
Eficiencia térmica (%)	56
Eficiencia eléctrica (%)	29
Permita regulación de carga	Sí
Intervalo de mantenimiento (h)	10.000
Cilindros, número y disposición	3-L



## 4. MODELIZACIÓN

Como ya se ha indicado con anterioridad tras el diseño de la instalación, se simulará mediante la utilización del software TRNSYS 17.

### 4.1 TRNSYS 17

TRNSYS es un software destinado a la simulación transitoria de sistemas. Es utilizado por los ingenieros e investigadores de todo el mundo para validar nuevos conceptos de energía, a partir de sistemas de agua caliente domésticos de sencillo diseño, simulación de edificios y su equipamiento, incluyendo las estrategias de control, el comportamiento de los ocupantes, sistemas de energía alternativa (eólica, fotovoltaica, sistemas solares, de hidrógeno), etc.

Uno de los factores clave en el éxito de TRNSYS en los últimos 25 años es su carácter abierto, además de su carácter modular, sus modelos de componentes entre otros, lo que en conjunto simplifica y facilita las necesidades específicas del usuario.

Además, TRNSYS se puede conectar fácilmente a muchas otras aplicaciones, para el pre- ó post-procesamiento o bien por medio de llamadas interactivas durante la simulación (por ejemplo, Microsoft Excel, Matlab, COMIS, etc.)

La principal ventaja de este programa es la exactitud de simulación, es decir, un control de resultados variables a cada hora según los datos que se le introduzcan. Es por esto por lo que se ha escogido este software para la simulación.

El software se compone de una serie de programas, entre ellos se encuentra TRNSYS Simulation Studio y TRNBUILD que son los que se han utilizado en este proyecto.

Simulation Studio es la parte del software destinada al diseño de las instalaciones que permite la implantación del conjunto de equipos a TRNSYS para realizar una simulación lo más parecida a la realidad posible. Para ello cada componente del sistema va a introducirse en el programa como Type, éstos son modelos que posee el software para representar los elementos posibles de cualquier instalación. En caso de no encontrar un Type acorde a un componente o con unas características que no se ajusten a ningún elemento incluido en el

programa, el usuario también tiene la posibilidad de codificar y generar sus propios Types.

Por su parte TRNBUILD es el programa dentro de TRNSYS enfocado a la modelización de edificios permitiendo una caracterización muy precisa de los mismos desde cerramientos y huecos hasta cargas internas, ganancias solares entre otros.

### 4.2 Simulación de las instalaciones

Como ya se ha indicado con anterioridad una vez calculado y diseñado la instalación se procede a su simulación con TRNSYS Simulation Studio. Para ello se irán introduciendo los diferentes elementos en forma de Types.

Los Types son elementos en los cuales se les introduce una serie de datos y parámetros característicos para adaptarlos de forma que representen a los equipos reales de la instalación. Esas entradas provocan unas salidas características en el mismo. Las entradas y salidas de los diferentes Types de una simulación pueden relacionarse estableciendo una dependencia entre ellos.

En la figura 12 se recoge el esquema de funcionamiento de un type:



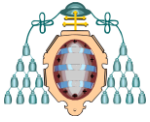
**Figura12. Esquema de funcionamiento de un Type**

### 4.3 Types principales

A continuación se irán describiendo de forma detallada los principales y más relevantes Types seleccionados para la implementación de la instalación en el programa.

#### *TYPE 109 –TMY2. Datos meteorológicos*

Este componente tiene como objetivo principal la lectura de datos meteorológicos referentes a una ubicación específica en unos intervalos de tiempo teniendo como origen una base de datos en la cual se recogen datos tales como radiación directa y radiación difusa para



diferentes superficies con una orientación e inclinación determinada, temperatura del lugar determinado, entre otros.

El Type 109 lee un archivo de datos meteorológicos (en este caso, se trata de un archivo .tm2 correspondiente a los datos de Gijón) y mediante modelos matemáticos genera la radiación total, directa y difusa, para un número arbitrario de caras con orientación e inclinación arbitrarias también. Estas variables salen de este Type y se colocan como entradas de otros elementos. Estos datos climáticos han sido extraídos de la base de datos de Meteonorm.



**Figura 13. Esquema del Type 109-TMY2-Datos meteorológicos**

*TYPE 56. Vivienda*

Este componente simula el comportamiento térmico de un edificio dividido en diferentes zonas térmicas. Para utilizar este componente, es necesario un programa de pre-procesamiento independiente, este programa es TRNBUILD, el cual lee y procesa un archivo que contiene la descripción de la construcción y genera dos archivos que serán utilizados por el Type56 durante la simulación en TRNSYS.

El archivo (.b17) que contiene la descripción del edificio puede ser procesada por TRNBUILD o estar generado por el usuario con cualquier editor de texto. Esta descripción debe incluir desde cerramientos, orientación y situación de la vivienda, características de los huecos hasta sistemas de calefacción, ventilación, refrigeración o ganancias internas y ganancias solares o incluso infiltraciones.

Entre las características de este componente destaca la posibilidad de definir las entradas y salidas por parte del usuario según sus necesidades. De este modo, pueden activarse y desactivarse las diferentes instalaciones y sistemas que posea el edificio a la hora de realizar la simulación.

En cuanto al balance de energía que tiene lugar en su interior se recoge en la siguiente expresión:

$$Q_{HEAT} + Q_{SOL} + Q_{GINT} + Q_{COUPL} + Q_{WGAIN} = Q_{TRANS} + Q_{INF} + Q_{VENT} + Q_{COOL}$$

En el cual:

- QHEAT: Calor sensible (convección y radiación);
- QSOLGAIN: Ganancias solares;
- QGAININT: Ganancias internas (convección y radiación);
- QTRANS: Pérdidas por transmisión;
- QINF: Pérdidas por infiltraciones;
- QVENT: Pérdidas por ventilación;
- QCOOL: Carga refrigeración;
- QCOUPL: Intercambio de energía entre zonas contiguas;
- QWGAIN: Ganancias por los cerramientos;



**TYPE 56**  
**Multizone Building**

**Figura 14. Esquema del Type 56-Vivienda**

*TYPE 667. Recuperador de calor*

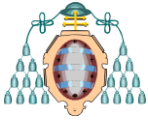
Este componente modela un dispositivo de recuperación de calor en el que dos corrientes de aire se cruzan a contracorriente produciéndose de este modo una transmisión de calor y humedad. El modelo se puede usar para modelar un dispositivo con cualquier configuración de flujos de aire (flujo paralelo, de flujo cruzado, contracorriente, etc.) y puede ser utilizado para modelar los aspectos sensibles y latentes de una corriente de aire.

Para lograr su finalidad, las dos corrientes se llamarán "aire fresco" y "aire de escape" debido a que comúnmente, una corriente de aire (en concreto el aire de escape) en el dispositivo de recuperación de calor se utiliza para el precalentamiento del aire fresco que será introducido en el edificio mientras el aire de escape se expulsará al exterior una vez aprovechado en el recuperador.

En este componente tiene lugar una transmisión de calor sensible y latente según las siguientes ecuaciones:

$$Q_{sensible} = \epsilon_{sensible} \dot{m} (T_{exhaust,in} - T_{fresh,in})$$

$$Q_{total\ exhaust} = \dot{m} (h_{exhaust,in} - h_{exhaust,out})$$



$$Q_{\text{total fresh}} = \dot{m}(h_{\text{fresh,in}} - h_{\text{fresh,out}})$$

$$Q_{\text{latente}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{sensible}}$$

Siendo:

- $Q_{\text{sensible}}$ : Calor sensible;
- $Q_{\text{latente}}$ : Calor latente;
- $Q_{\text{total}}$ : Total calor transmitido entre las dos corrientes;
- $\dot{m}$ : flujo másico de las corrientes de aire;
- $\varepsilon_{\text{sensible}}$ : Eficiencia sensible del equipo;
- $T_{\text{exhaust,in}}$ : Temperatura de entrada de la corriente de aire de escape;
- $T_{\text{fresh,in}}$ : Temperatura de entrada del aire fresco;
- $h_{\text{exhaust,in}}$ : entalpía de la corriente de aire de escape a la entrada;
- $h_{\text{exhaust,out}}$ : entalpía de la corriente de aire de escape a la salida;
- $h_{\text{fresh,in}}$ : entalpía de la corriente de aire fresco a la entrada
- $h_{\text{fresh,out}}$ : entalpía de la corriente de aire fresco a la salida;



Figura 15. Esquema del Type 667-Recuperador de calor

#### TYPE 1231. Radiador

Este modelo representa unidades de baja temperatura cuya finalidad es la distribución de calor. Entre ellos se encuentran radiadores, convectores y las unidades de placa base y de tubos con aletas. Este tipo de equipos destacan por la transmisión de calor a través de una combinación de radiación y convección, sin ventiladores.

Este Type puede representar una gran diversidad de equipos, siendo necesaria la adaptación por parte del usuario de algunos parámetros para lograr la representación concreta del equipo de la instalación real. Entre estos parámetros destaca la siguiente ecuación representativa de cada componente:

$$q = c(T_s - T_a)^n$$

En donde:

- $q$ : potencia transmitida;
- $c$ : factor de corrección;
- $T_s$ : temperatura de diseño de la superficie del radiador;
- $T_a$ : temperatura de diseño del ambiente;
- $n$ : coeficiente característico de cada tipo de dispositivo;

Además el calor transmitido por el agua circundante en estos equipos se rige por la siguiente ley:

$$q_{\text{water}} = \dot{m} cp (T_{\text{water,in}} - T_{\text{water,out}})$$

En donde:

- $\dot{m}$ : flujo másico de agua en el interior;
- $cp$ : calor específico del agua;
- $T_{\text{water,in}}$ : temperatura del agua a la entrada;
- $T_{\text{water,out}}$ : temperatura del agua a la salida.



Type1231

Figura 16. Esquema del Type 1231-Radiador

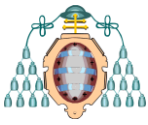
#### TYPE 201.MACI (Motor Alternativo de Combustión Interna)

En el caso de este elemento ha sido necesaria su implementación, puesto que el motor alternativo disponible en TRNSYS no cumplía con los requisitos deseados para una correcta modelización del motor de microgeneración escogido en este Trabajo Fin de Máster.

El Type finalmente diseñado es un motor alternativo de combustión interna que representa a la perfección al motor escogido en el presente trabajo y el cual posee, entre otras características, la regulación de carga en función de la demanda, además de la producción simultánea de calor y electricidad.

Este componente destaca principalmente por poseer una señal de control encargada de activar o desactivar el funcionamiento del motor en función de la temperatura del interior de la vivienda, garantizando de este modo unas condiciones ambientales de confort en el interior.

En cuanto a las funciones que controlan el funcionamiento del mismo y referentes principalmente a potencia térmica producida,



potencia eléctrica generada, consumo de combustible y carga parcial, se resumen en las siguientes expresiones a partir de las cuales se ha implementado el código de este componente. Estas expresiones se han ajustado por funciones a los datos ofrecidos por el fabricante en los cuales el valor de las variables se han fijado en función de la carga del motor.

$$Q_w = \dot{m} c_p (T_{set} - T_{in})$$

$$f = 0,377Q_w - 0,0118Q_w^2 - 1,5468$$

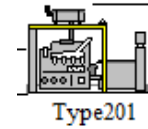
$$W_e = 5 f$$

$$Q_f = 2,4 f^2 + 8,6 f + 6,2$$

$$Rendimiento = (Q_w + W_e) / Q_f$$

En estas expresiones  $Q_w$  se refiere a la potencia térmica producida,  $W_e$  es la potencia eléctrica generada y  $Q_f$  la potencia del combustible necesaria. Por otro lado  $f$  se refiere a la fracción de carga parcial,  $\dot{m}$  es el flujo

másico de agua por el interior del motor,  $c_p$  se refiere al calor específico de dicho líquido,  $T_{set}$  es la temperatura de referencia la cual se desea que alcance el fluido a la salida del equipo y  $T_{in}$  se trata de la temperatura de este mismo fluido a la entrada del motor.



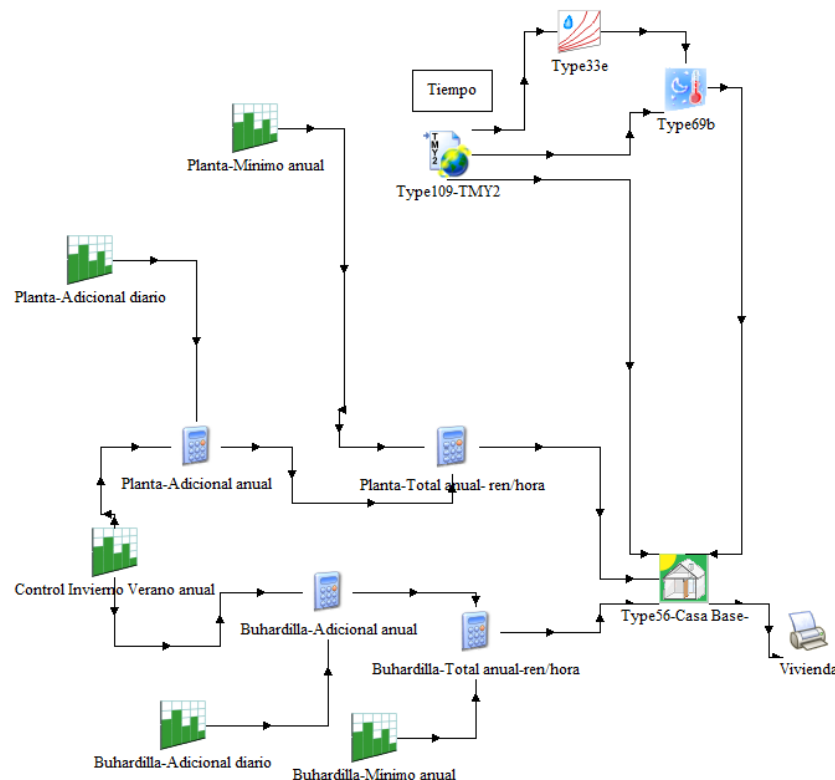
**Figura 17. Esquema del Type 201-MACI**

### 5. CASOS ESTUDIADOS

Este Trabajo Fin de Máster se ha enfocado hacia el ahorro de energía y eficiencia energética obtenida a partir de las dos instalaciones diseñadas; por ello los resultados que se muestran a continuación se encuentran relacionados principalmente con estos dos términos.

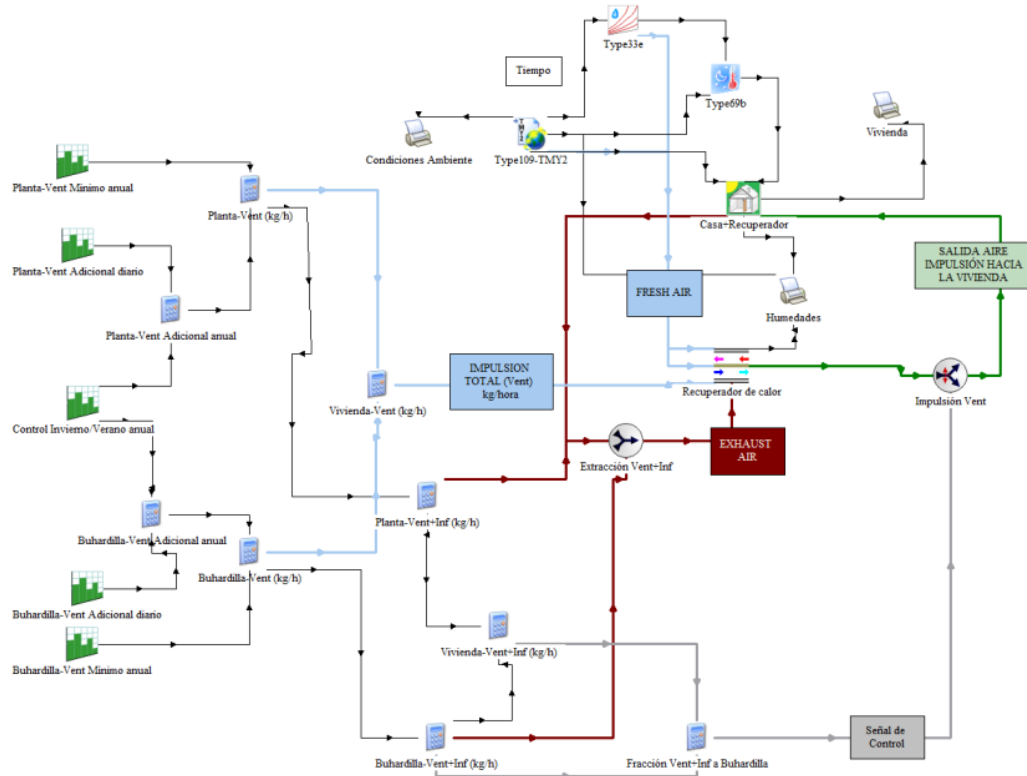
El análisis de resultados se ha dividido en 3 casos principales:

- **Caso 1:** Vivienda unifamiliar base sin ninguna instalación ni ventilación ni calefacción. En la figura 18 se muestra el esquema implementado en TRNSYS para su modelización.



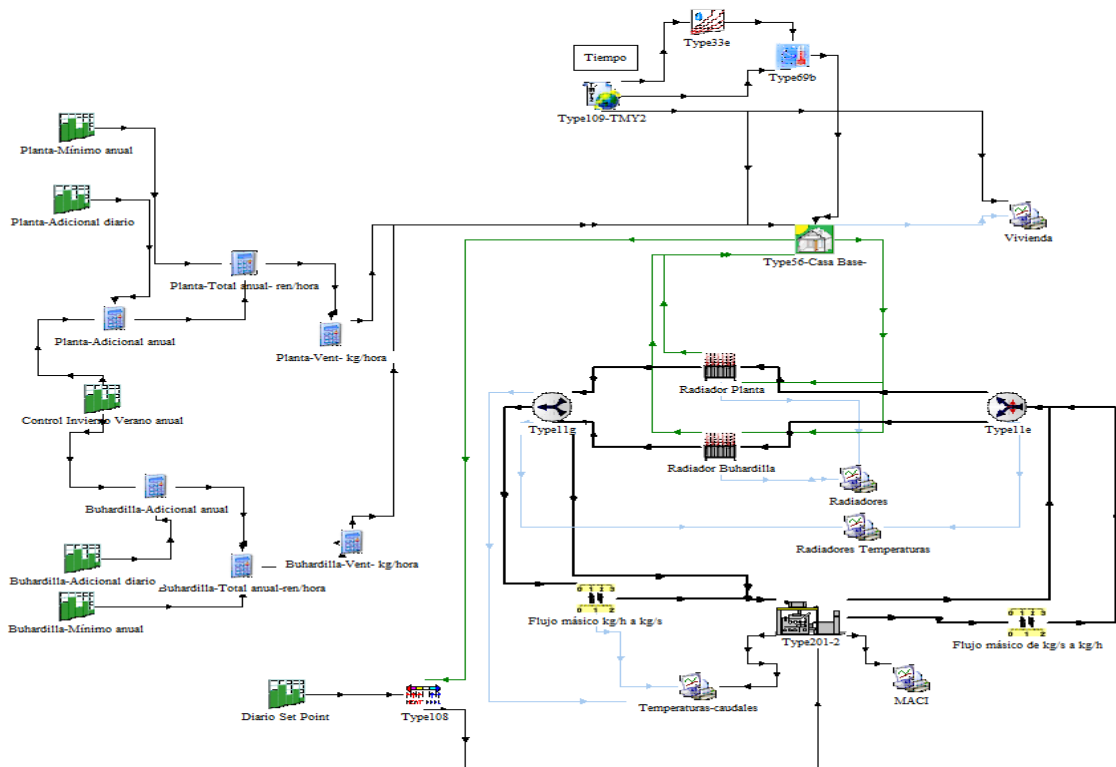
**Figura 18. Esquema implementado en TRNSYS 17 del caso 1**

- **Caso 2:** Vivienda unifamiliar junto con la instalación de ventilación con recuperación de calor. Este caso se encuentra representado en la figura 19.



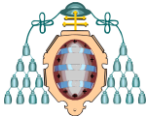
**Figura 19. Esquema implementado en TRNSYS 17 del caso 2**

- **Caso 3:** Vivienda unifamiliar con motor alternativo de combustión interna destinado a la cogeneración en la instalación de calefacción. En la figura 20 se muestra el esquema de la instalación de este caso.



**Figura 20. Esquema implementado en TRNSYS 17 del caso 3**





## 6. RESULTADOS

En cuanto a los períodos de simulación y obtención de resultados se ha escogido 3 semanas representativas:

MES	DÍAS	PERIODO
Enero	12Enero-19Enero	Calefacción
Marzo	12Marzo-19Marzo	Calefacción
Octubre	12Octubre-19Octubre	Calefacción

Además, el día 15 de Enero incluido en la semana escogida de ese mes, va a ser analizado de forma independiente, puesto que es el día en el que se registran la temperatura mínima anual y resulta interesante el análisis del comportamiento del motor alternativo de combustión interna en este día.

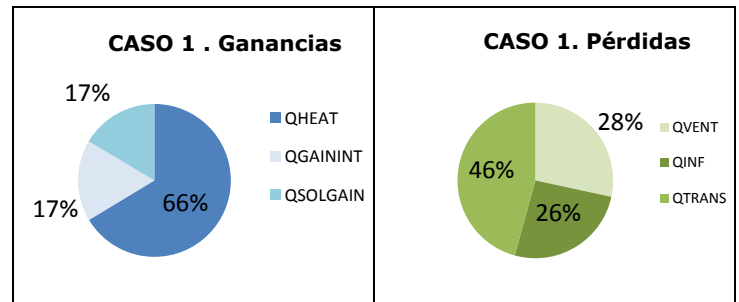
### 6.1 INSTALACIÓN CON RECUPERACIÓN DE CALOR

#### 6.1.1 Ahorro Energético. Balance de energía

El principal motivo del diseño y uso de estas instalaciones es la eficiencia energética traducida en un ahorro de energía. Debido a esto resulta interesante analizar los consumos de energía en los diferentes casos de estudio. En este caso se ha prestado especial atención a los casos 1 y 2. Para ello se han realizado los diferentes balances energéticos en cada una de las hipótesis durante todo el período de invierno, en el cuál la instalación de calefacción se va a encontrar en funcionamiento.

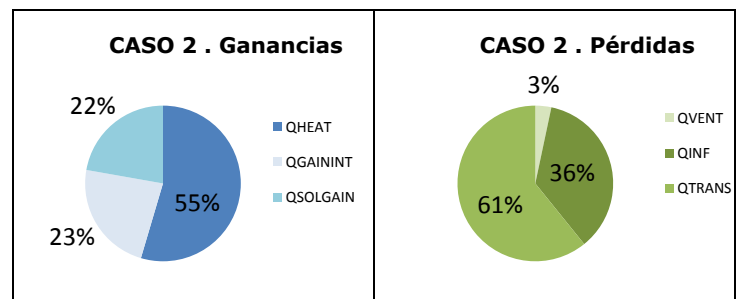
Para ello se ha partido del balance energético que tiene lugar en la vivienda pero teniendo en cuenta que el caso del período de calefacción, no va a estar activada la refrigeración por lo tanto QCOOL es nula. Además en el presente trabajo las ganancias por los cerramientos, QWGAIN, y los intercambios de energía entre espacios contiguos, QCOUPL, se van a considerar despreciables.

A partir de lo anterior en la figura 21 se representa el reparto de energía en la vivienda base sin ningún tipo de instalación adicional. En ella destacan principalmente las elevadas pérdidas por transmisión, alcanzando el 46% del total de pérdidas frente al 28% de las pérdidas por ventilación y el 26% referente a las pérdidas por infiltraciones.



**Figura 21. Balance energético en el caso 1**

En el caso 2, en el cuál se analiza la vivienda junto con la instalación de ventilación con recuperación de calor, destaca cómo con la instalación del recuperador de calor las pérdidas por ventilación disminuyen drásticamente de un 28% a un 3%, como puede apreciarse en la figura 22. Por otro lado las pérdidas por infiltraciones aumentan un 10 % al instalar el sistema de recuperación. Además puede verse como disminuye la energía necesaria para elevar la temperatura de la vivienda (QHEAT) descendiendo de un 66% hasta un 55% al aprovechar el intercambio de calor que tiene lugar en el recuperador de calor.

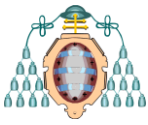


**Figura 22. Balance energético en el caso 2**

Finalmente en la tabla 11 se recogen los valores numéricos de las energías aportadas y pérdidas por m<sup>2</sup> de superficie útil para el periodo de invierno (Octubre-Mayo).

**Tabla 11. Reparto de cargas en los 2 casos de estudio**

	Ganancias		
	QHEAT (kWh/m <sup>2</sup> )	QGAININT (kWh/m <sup>2</sup> )	QSOLGAIN (kWh/m <sup>2</sup> )
CASO 1	64,15	16,62	15,91
CASO 2	39,09	16,62	15,91



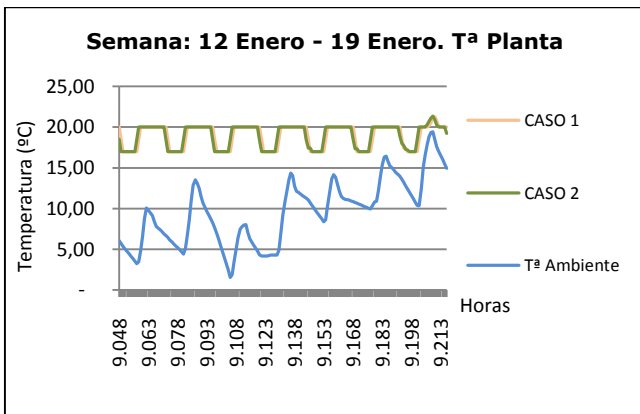
<i>Pérdidas</i>			
	<b>QVENT (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>QINF (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>QTRANS (kWh/m<sup>2</sup>)</b>
CASO 1	27,45	25,02	44,22
CASO 2	2,38	25,70	43,56

A partir de la tabla 11, se aprecia como en el caso llamativo de la ventilación, las pérdidas descienden de 27,45 kWh/m<sup>2</sup> hasta aproximadamente un décima parte, 2,38 kWh/m<sup>2</sup>, con la instalación del recuperador de calor seleccionado.

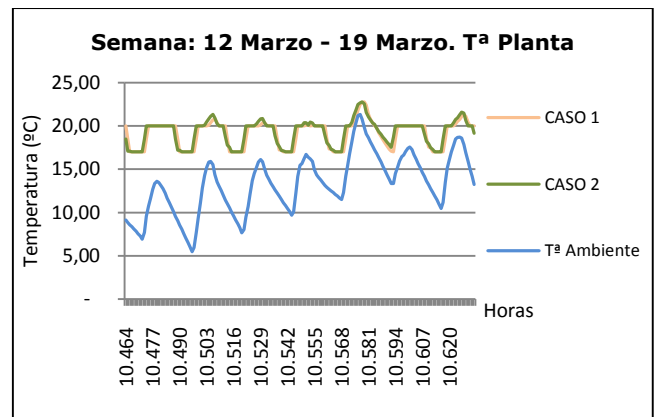
### 6.1.2 Condiciones ambientales en la vivienda

Aparte del ahorro energético es necesario proporcionar unas condiciones de confort en el interior de la vivienda. Por ello en este apartado se van a analizar las condiciones ambientales referentes a temperatura y humedad relativa de la planta de la vivienda, puesto que se ha considerado como la zona principal de la misma.

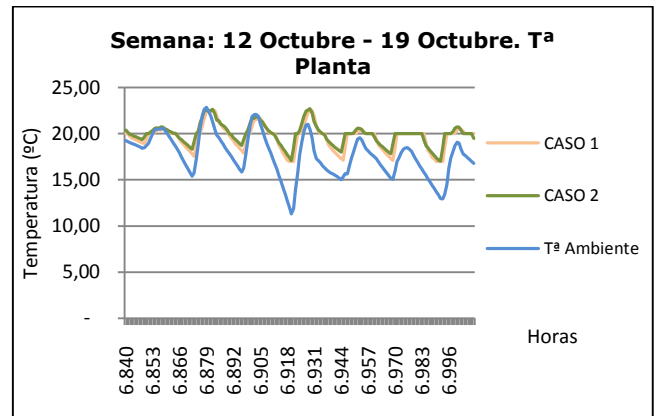
En las figuras 23-25 se muestran estas condiciones en el interior de la vivienda en los 2 casos anteriores junto con las condiciones ambientales en el exterior durante las 3 semanas representativas. En las figuras 19-21 puede verse cómo con la instalación del recuperador de calor se mantiene un patrón de temperatura semejante al caso de la casa base. Esto quiere decir que el recuperador de calor es capaz de proporcionar las mismas condiciones de confort referidas a temperatura pero con un menor consumo energético y, por tanto, una mayor eficiencia energética.



**Figura 23. Evolución de la temperatura en la Planta de la vivienda durante la semana característica de Enero**

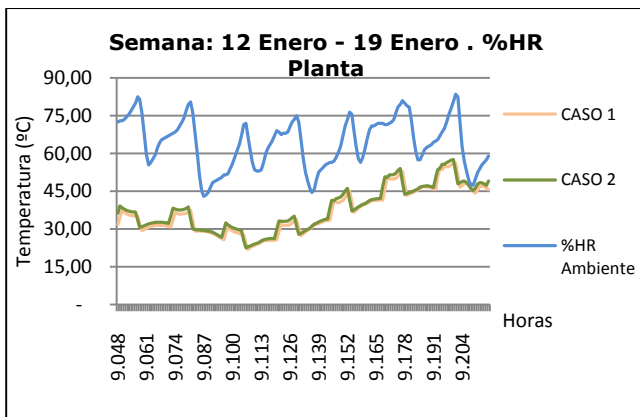
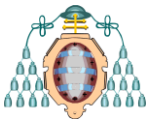


**Figura 24. Evolución de la temperatura en la Planta de la vivienda durante la semana característica de Marzo**

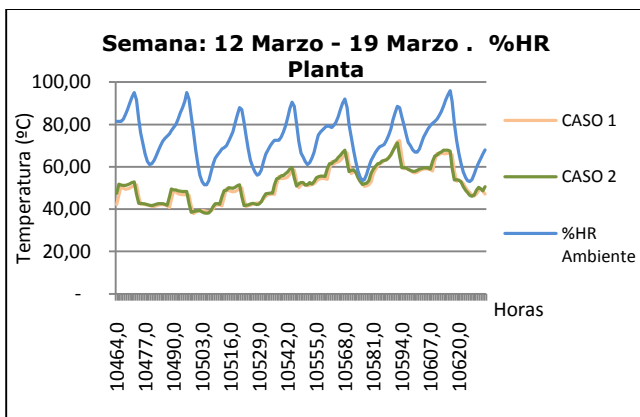


**Figura 25. Evolución de la temperatura en la Planta de la vivienda durante la semana característica de Octubre**

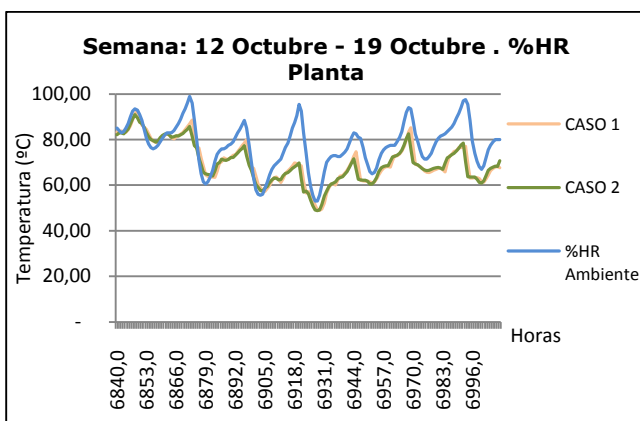
Otro parámetro interesante de analizar es la humedad relativa de la vivienda, puesto que afecta directamente al confort. Además, en el presente trabajo, como ya se ha indicado en apartados anteriores, se ha escogido un recuperador en el cual se va a producir una transmisión de calor latente, por lo tanto, puede afectar a la humedad contenida en la corriente de aire, tanto de escape como de entrada. Al igual que con las temperaturas, la humedad relativa del ambiente varía entre las 3 semanas consideradas en este estudio por ello se ha decidido observar este valor en los 3 períodos considerados.



**Figura 26. Evolución del porcentaje de humedad relativa en la Planta de la vivienda durante la semana característica de Enero**



**Figura 27. Evolución del porcentaje de humedad relativa en la Planta de la vivienda durante la semana característica de Marzo**



**Figura 28. Evolución del porcentaje de humedad relativa en la Planta de la vivienda durante la semana característica de Octubre**

relativa de la vivienda puesto que mantiene los mismos valores que en el caso 1 en el cual la vivienda no posee ninguna instalación adicional.

A pesar de lo anterior es importante hacer hincapié en el control de humedad de la vivienda puesto que como se puede apreciar en las figuras anteriores sufre variaciones considerables en las 3 semanas analizadas. El mes de Marzo destaca por ser en el cuál se registran los valores más acordes a los considerados como condiciones óptimas de confort registrados entre el 40% y el 60%, según la figura 27. Sin embargo en el caso de Enero, debido principalmente a las bajas temperaturas del exterior y la necesidad por lo tanto de una carga térmica mayor, implica un descenso de la humedad relativa reflejada en la figura 26. Finalmente por otro lado el caso de Octubre se encuentra muy influenciado por la humedad relativa del exterior y alcanza los valores más altos de los 3 supuestos, alcanzando valores superiores al 60% durante el mayor porcentaje de horas.

## 6.2 Instalación de cogeneración

En el caso del motor alternativo de combustión interna y de los radiadores se ha decidido realizar el análisis de diversos parámetros que afectan al funcionamiento del mismo. Estos parámetros son:

- Paso temporal de la simulación,
- Caudal de los radiadores,
- Temperatura de impulsión fijada por el usuario.

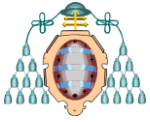
### 6.2.1 Paso temporal de la simulación

Uno de los parámetros que afectan directamente a los resultados obtenidos en los programas de estudio dinámico de sistemas es el paso temporal seleccionado a la hora de realizar la simulación.

En el caso particular de equipos como el motor de cogeneración cuyo comportamiento depende directamente de valores instantáneos es muy importante la correcta selección del paso temporal o Timestep para unos resultados correctos y una simulación real de la instalación.

El paso temporal afecta directamente a la discretización de las ecuaciones de la instalación,

En las figuras 26-28 se representa la humedad relativa de la Planta la cual sigue un mismo patrón tanto con recuperador de calor como sin él. Por lo tanto la instalación del recuperador de calor no afecta a la humedad



por lo tanto, un Timestep demasiado elevado no aporta una gran fiabilidad, mientras que un paso temporal menor ofrece un mayor control y un seguimiento más detallado de las variables y, por lo tanto, más similitud con la realidad puesto que representa con mayor exactitud la instalación.

En este trabajo se ha decidido analizar el comportamiento de los radiadores utilizando 2 pasos temporales distintos del caso base el cual se ha establecido con un Timestep=1hora. Estos supuestos serán de 5 minutos y 30 minutos. Además, debido a la complejidad de las gráficas, se han extraído sólo los resultados del día 15 de Enero.

En la figura 29 se muestra la carga parcial con la que trabaja el motor en los 3 casos de estudio, en ella puede apreciarse cómo varían los resultados debido a la cantidad de datos recogidos en cada uno de ellos, esto va a afectar directamente a la potencia producida y a los consumos del motor. En dicha figura puede observarse cómo el motor se encuentra continuamente en arranque y parada, siendo en el caso de un paso temporal de 5 minutos donde más se repite este suceso. Esto es debido a que su funcionamiento está controlado por un termostato que se rige por la temperatura ambiente de la planta, por lo que no produce un seguimiento continuo de alguna variable que regule el funcionamiento del equipo de una forma más progresiva, y por lo tanto el motor debe satisfacer la demanda de forma inmediata.

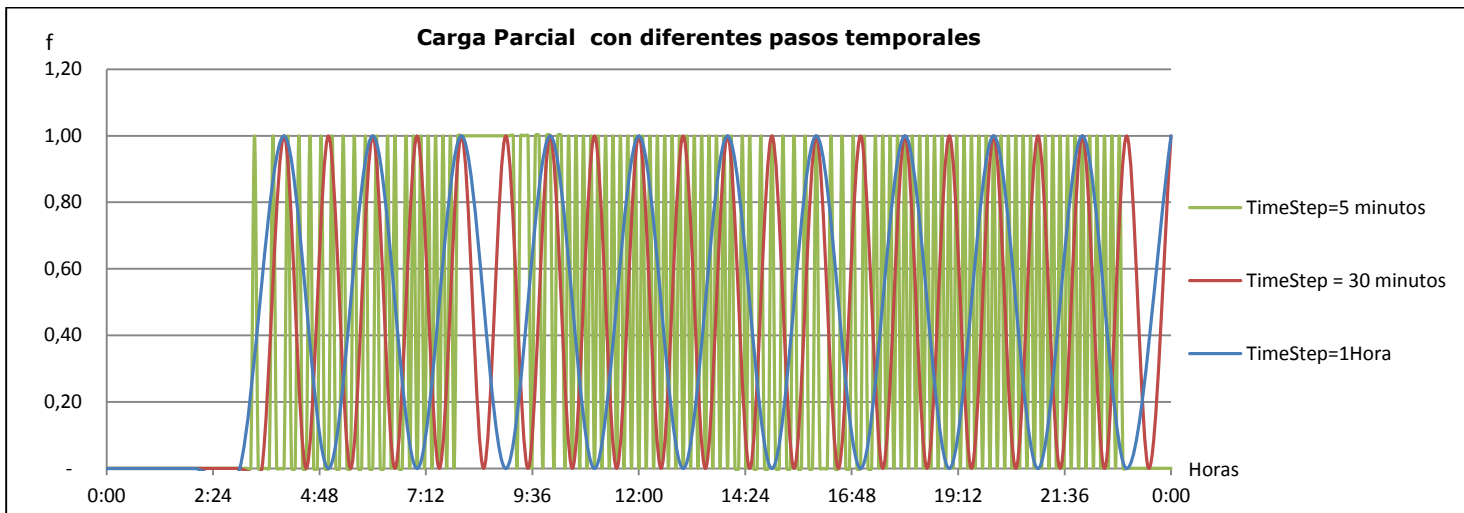
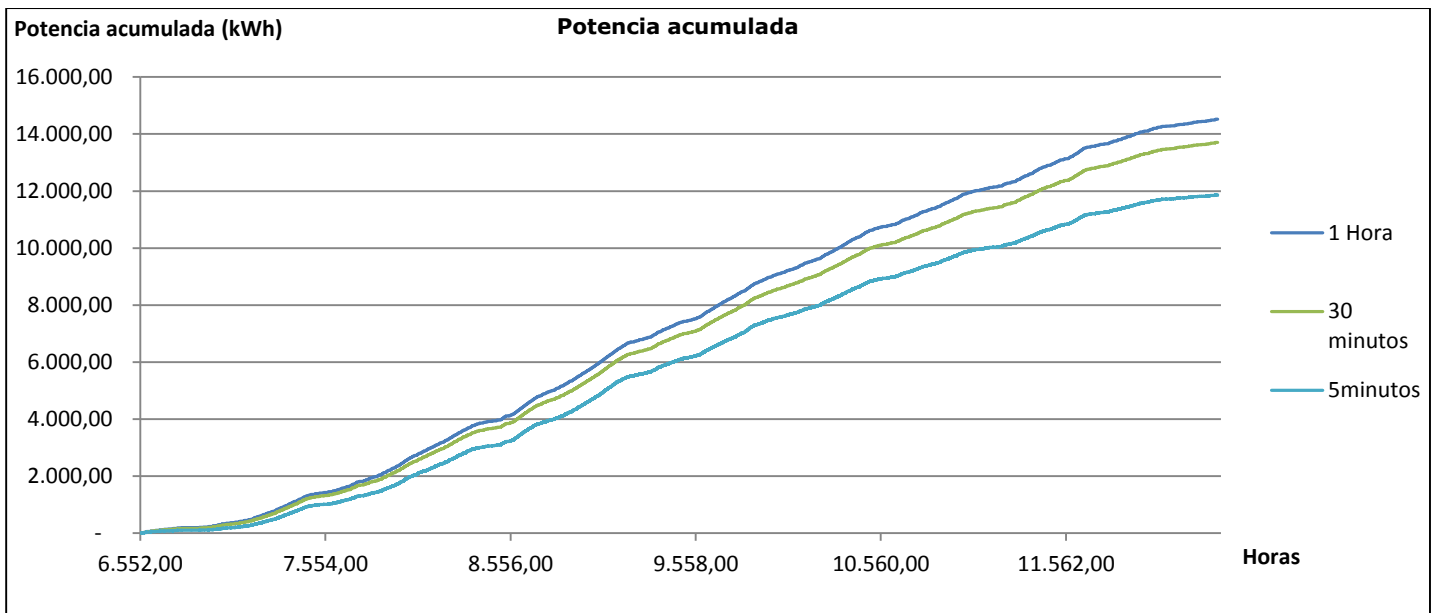
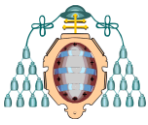


Figura 29. Factor de carga del motor con diferentes pasos temporales

En la figura 30 se representa la potencia acumulada de este componente en donde se aprecia cómo analizando todo el período en el cuál la instalación de calefacción está activada, los resultados varían considerablemente según el paso temporal seleccionado. En el caso del uso de un TimeStep de 1 hora se obtiene la potencia acumulada mayor de los 3 supuestos, puesto que el motor según la simulación realizada con este paso temporal se encuentra más tiempo funcionando al no entrar en detalle en los parámetros que controlan el funcionamiento del mismo.

Al final del período analizado la diferencia entre el paso temporal mayor y el menor es entorno al 18%, un valor considerablemente alto teniendo en cuenta la potencia nominal del motor de 9,7 kW y el total de horas analizadas.

Otro dato que destaca en la figura 30 es la diferencia entre la potencia acumulada en las simulaciones realizadas con un Timestep de 1 hora y 30 minutos puesto que aunque existe una diferencia entre ellos, ésta es relativamente pequeña frente a la diferencia con el resultado obtenido en el caso de 5 minutos.



**Figura 30. Potencia acumulada en el período de invierno**

En cuanto a las energías consumidas y producidas por parte del motor durante todo el período se recogen en la tabla 12 donde se observa cómo con un paso temporal más pequeño la energía producida por el motor es menor que en los otros dos supuestos. Esto es debido a que el motor se encuentra menos tiempo funcionando de continuo pero como se apreciaba en la gráfica del factor de carga se encuentra durante todo el período de forma continua arrancando y parando; esto además se refleja también en la potencia eléctrica generada y el consumo de combustible.

Atendiendo a los resultados anteriores se ha apreciado como la elección de un paso temporal apropiado influye directamente en los resultados. Sería necesario un estudio detallado para la definición del Timestep sin que éste afecte a los resultados. Esto último no es objeto de estudio en este trabajo y se ha decidido fijar el paso temporal en 5 minutos para el estudio de los diferentes casos anteriormente presentados

**Tabla 12. Energías totales en el motor durante todo el período de invierno**

TimeStep	Energía Térmica Motor (kWh)	Energía Eléctrica Motor (kWh)	Consumo combustible (KW)
<b>1 hora</b>	14.520,90	7.485,00	25.748,40
<b>30 min</b>	13.706,10	7.065,00	24.303,60
<b>5 min</b>	11.865,52	6.116,25	21.039,90

### 6.2.2 Temperatura de impulsión

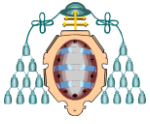
Una de las variables a introducir en el motor es la temperatura a la cual se desea elevar el caudal del fluido. Este dato es denominado Tset.

En esta instalación se han elegido unos radiadores de baja temperatura, por lo que la potencia exigida por parte del motor se va a encontrar fuertemente influenciada por la temperatura a la cual se desea que el agua sea impulsada hacia los mismos.

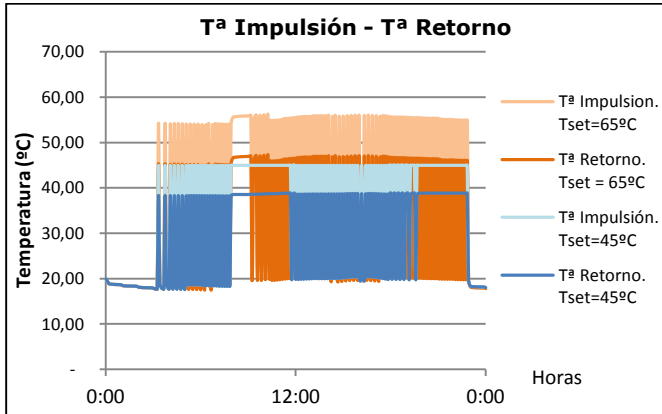
Los motores de cogeneración actuales trabajan con unas temperaturas de impulsión muy altas y unas diferencias de temperatura elevadas lo que implica una mayor potencia térmica necesaria y, por lo tanto, un mayor consumo de combustible.

Debido a ello, se ha realizado un análisis sobre la modificación de la temperatura de consigna fijada por el usuario estableciendo dos temperaturas tipo; por un lado 45°C puesto que los radiadores instalados han sido diseñados para trabajar a esta temperatura y proporcionar la máxima potencia, y por otro lado a 65°C puesto que es una temperatura tipo de algunos radiadores convencionales y además el motor elegido es capaz de proporcionar este valor.

En la figura 31 se recogen las temperaturas de retorno e impulsión registradas en el fluido a su paso por el motor. Destaca cómo en el caso

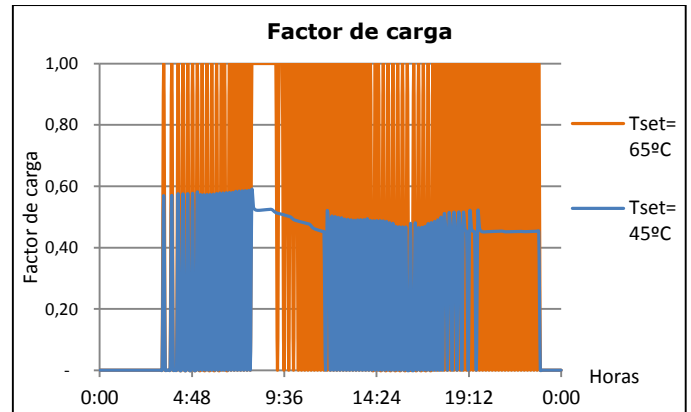


de  $T_{set} = 65^{\circ}\text{C}$  no se alcanza dicho valor en ningún momento, esto puede ser debido a dos posibles supuestos: primero que las necesidades energéticas de la vivienda no exijan temperaturas tan elevadas o por otro lado que el motor elegido no sea capaz de elevar el caudal de agua hasta  $65^{\circ}\text{C}$ .



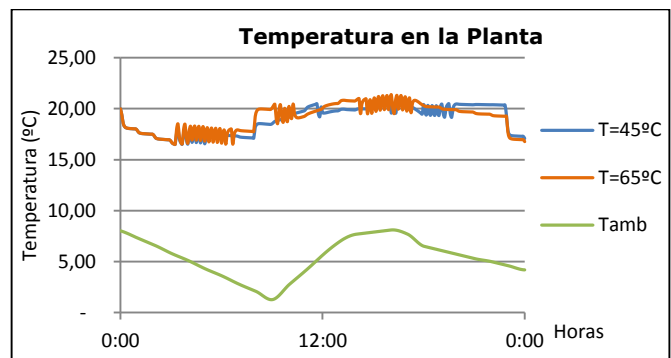
**Figura 31.  $T^{\text{a}}$  Impulsión y  $T^{\text{a}}$  de retorno del fluido a su paso por el motor durante el día 15 de Enero con diferentes temperaturas de impulsión**

Para comprobar el motivo de los resultados se ha prestado atención al factor de carga puesto que elevar el caudal del fluido hasta temperaturas de impulsión diferentes afecta a la potencia térmica requerida y por lo tanto al factor de carga. En la figura 32 se muestran los valores que adquiere el factor de carga a lo largo del 15 de Enero; entre los resultados se observa que para elevar el caudal hasta  $65^{\circ}\text{C}$  es necesario que el motor funcione en carga nominal, mientras que si la temperatura de consigna se disminuye hasta  $45^{\circ}\text{C}$  ya no es necesaria una potencia tan elevada sino que el motor va a estar funcionando entorno al 50% de carga. Este resultado es importante puesto que va a repercutir directamente tanto en los consumos de combustibles como en las emisiones producidas debido a la combustión.



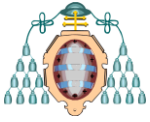
**Figura 32. Factor de carga del motor durante el día 15 de Enero con diferentes temperaturas de impulsión**

Finalmente, al igual que en el caso del recuperador todo ahorro energético resulta interesante siempre que se conserven las condiciones de confort en el interior de la vivienda. Para ello, se mide la temperatura de la Planta de la vivienda, la cual se representa en la figura 33. En ella se aprecia cómo tanto con  $T_{set}=45^{\circ}\text{C}$  como con  $T_{set}=65^{\circ}\text{C}$  la temperatura en la zona principal de la vivienda es similar, esto quiere decir, que teniendo en cuenta los equipos que constituyen la instalación y la carga térmica a satisfacer sería suficiente establecer una temperatura de consigna en el motor de  $45^{\circ}\text{C}$  puesto que elevarla hasta  $65^{\circ}\text{C}$  implica unos consumos de energía innecesarios.



**Figura 33. Temperatura de la Planta durante el día 15 de Enero con diferentes temperaturas de impulsión**

A partir de los resultados anteriores se ha llegado a la conclusión de que el motor elegido en el presente trabajo no es capaz de elevar la temperatura del caudal de agua circulante hasta  $65^{\circ}\text{C}$  puesto que se encuentra operando a total carga. Esto quiere decir que la potencia térmica necesaria para elevar la temperatura hasta  $65^{\circ}\text{C}$  es mayor que la potencia nominal. Por lo tanto, teniendo en cuenta las ecuaciones implementadas en el MACI y que se muestran a



continuación, la máxima potencia que puede ofrecer éste es su potencia nominal.

A continuación se muestran las ecuaciones referentes a la potencia térmica entregada por el motor y que han sido implementadas en el código del mismo.

$$Q_{SET} = m_w c_p (T_{SET} - T_{RETORNO})$$

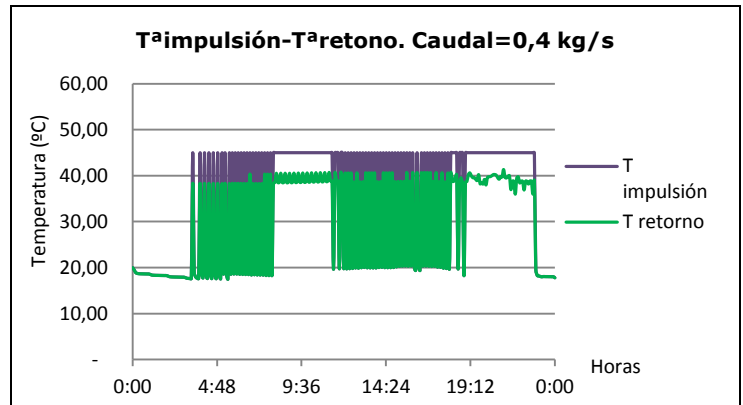
$$Q_W = \text{MIN}(Q_{NOMINAL}, Q_{SET})$$

$$Q_W = m_w c_p (T_{IMPULSIÓN} - T_{RETORNO})$$

### 6.2.3 Regulación de caudal

Una vez que se ha establecido como temperatura de impulsión 45°C como se ha explicado en el apartado anterior, se ha decidido analizar el funcionamiento de la instalación en caso de que el caudal de agua circulante fuera mayor o menor al caudal nominal de los radiadores. Para ello se ha decidido analizar un caudal de 0,1 kg/s y un caudal de 0,4 kg/s.

Para comenzar se ha analizado el comportamiento del motor en los 3 casos supuestos. En la figura 34 se muestran las temperaturas de impulsión y retorno con los 3 caudales analizados.



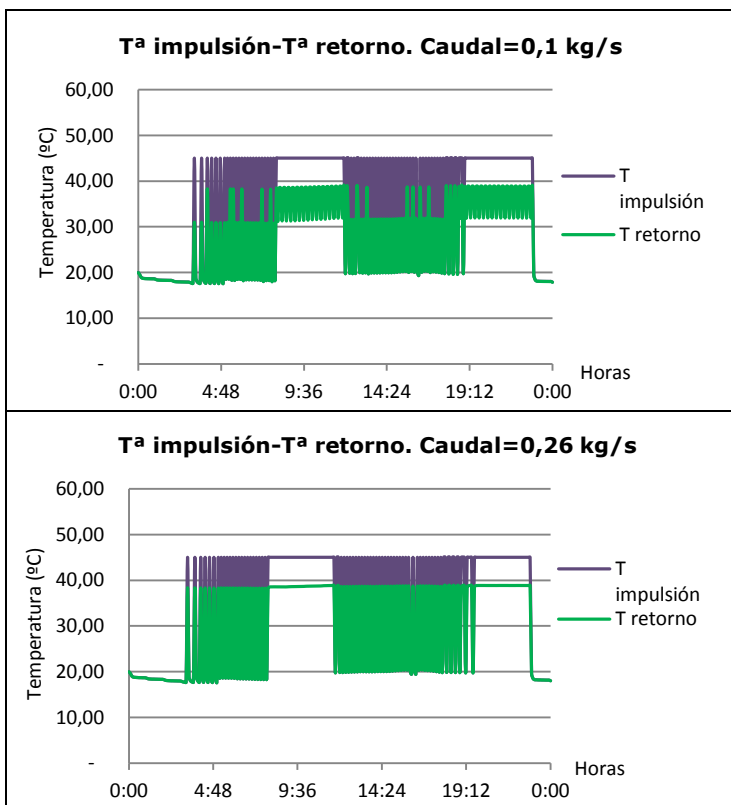
**Figura 34. Temperatura de impulsión y temperatura de retorno para diferentes caudales durante el día 15 de Enero**

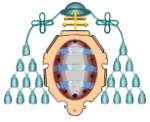
En la figura 33 se observa como el motor elegido es capaz de elevar los 3 caudales seleccionados hasta la temperatura fijada de 45°C mientras que en el caso de la temperatura de retorno se ve más afectada. En el primer caso considerado de 0,1 kg/s, la temperatura de retorno alcanza los valores más bajos siendo estos levemente superiores a 30°C excepto en 2 periodos de tiempo, uno en la mañana y otro en la tarde en los cuales la temperatura sube hasta un valor medio estimado de 35°C.

En los otros dos casos analizados ambos alcanzan temperaturas de retorno en torno a los 40°C siendo en el caso de caudal igual a 0,4 kg/s discretamente más altas que en el caso del nominal.

Otra característica observada son las fluctuaciones en la temperatura en los casos en los que se modifica el caudal. Esto probablemente es debido a la potencia entregada por los radiadores puesto que los equipos elegidos para este trabajo no permiten regulación de caudal.

Como ya se indicaba anteriormente el motor es capaz de elevar hasta la temperatura consigna los 3 caudales analizados por lo que otro resultado a analizar es el factor de carga con el cual trabaja el motor para lograr ese valor. En la figura 35 se muestra la carga con la que trabaja el motor con los 3 caudales estudiados. Se observa cómo a medida que se aumenta el caudal se necesita una potencia térmica mayor para elevar la temperatura. Por otro lado, a partir de la misma figura se aprecia cómo en ninguno de los 3 casos con una temperatura de impulsión fijada a 45°C no se llega al 100% de carga esto se traduce en que el





motor elegido para esta instalación admite caudales mayores a los analizados o que es posible establecer temperaturas superiores de impulsión en caso de utilizar alguno de los estudiados.

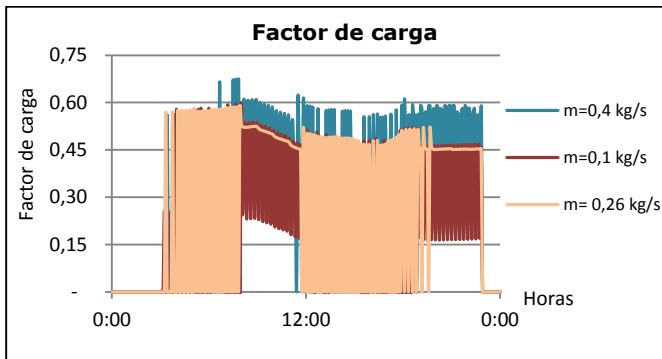


Figura 35. Factor de carga del motor para diferentes caudales durante el día 15 de Enero

Y por último, es necesario comprobar la temperatura en el interior de la vivienda puesto que puede verse afectado por el caudal ya que incide directamente en la potencia emitida por los radiadores.

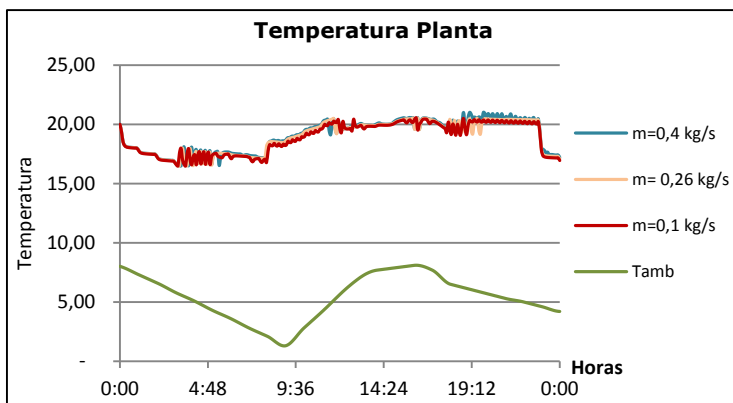


Figura 36. Temperatura de la Planta de la vivienda con diferentes caudales durante el día 15 de Enero

En la figura 36 se muestran las temperaturas registradas en los casos anteriores y se observa como en el caso de estudio de este proyecto la regulación del caudal no afecta a las condiciones de confort del interior del edificio. Esto es debido a que, como ya se ha explicado con anterioridad, el sistema satisface sin dificultad la demanda energética del edificio y, por lo tanto, es posible la regulación de diferentes parámetros que intervienen en el mismo, como en este caso el caudal.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha diseñado una instalación de calefacción con cogeneración y una instalación de ventilación con recuperación de calor para una vivienda unifamiliar situada en Gijón.

La instalación de cogeneración está formada por un motor alternativo de combustión interna junto con 2 radiadores principales situados cada uno de ellos en las zonas calefactadas del edificio: Planta y Buhardilla. Por otro lado la instalación de ventilación va a estar formada por un recuperador de calor encargado de precalentar el aire del exterior antes de introducirlo en la vivienda.

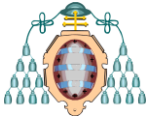
Para el diseño de estas instalaciones y elección de equipos se ha partido de la carga de diseño la cual se ha fijado como el 70% de la carga térmica máxima. A partir de este valor de 10,59 kW en el caso del periodo de calefacción y de 1,345 kW durante los meses en los que la refrigeración se encuentra activada, se ha escogido el motor y los radiadores correspondientes.

Sin embargo, este valor es una aproximación puesto que esta carga de diseño debe satisfacer el 97,5% de las horas estudiadas sin entrar en detalle en el comportamiento de los equipos durante este periodo. Debido a esto se ha desarrollado un modelo de la instalación en el software comercial TRNSYS que permite la simulación dinámica de la instalación para analizar su funcionamiento sometida a unas condiciones climáticas y de operación horarias.

A partir de la simulación de la instalación de recuperación durante el invierno se ha obtenido un ahorro energético del 11% frente al caso base sin recuperador, referente a la energía térmica necesaria para garantizar unas condiciones de confort en el interior de la vivienda.

Por otro lado, en la instalación de cogeneración se ha decidido estudiar la influencia de diferentes parámetros. Para comenzar se ha analizado la influencia del paso temporal en las simulaciones dinámicas y se ha observado cómo variando este parámetro entre los valores: 1 hora, 30 minutos y 5 minutos, se obtienen resultados muy dispares. Debido a esto es esencial realizar un estudio detallado del





TimeStep debido a las consecuencias directas que tiene en los resultados.

Otro parámetro analizado ha sido la temperatura de impulsión. Para ello se han analizado 2 temperaturas: 45°C y 65°C. A partir de los resultados obtenidos se observa como en el caso de bajas temperaturas el MACI opera con normalidad a carga parcial pero a temperaturas más elevadas como 65°C el motor no alcanza dicho valor aunque se encuentre trabajando a 100% de carga.

Y por último, en este trabajo no se han escogido radiadores que permitan la regulación de caudal pero se ha decidido analizar el comportamiento del motor con diferentes caudales de agua. Para ello, se han estudiado un caudal menor y otro caudal mayor al nominal. Se ha observado una vez analizado que el motor no presenta restricciones al variar este parámetro.

A la vista de los resultados, se concluye que resulta interesante completar estos resultados con unos trabajos futuros relacionados con:

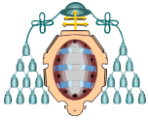
- Estudio detallado del paso temporal: a partir de los resultados obtenidos los cuales se encuentran fuertemente influenciados por el TimeStep escogido es necesario un estudio para la elección del paso temporal más apropiado para la correcta modelización de la instalación.
- En función de los resultados obtenidos es interesante un nuevo diseño de la instalación. Observando los resultados del motor, éste se encuentra continuamente encendiéndose y apagándose debido a las necesidades inmediatas que debe satisfacer, una posible solución para corregir esto es la instalación de un depósito de acumulación entre el motor y los radiadores en cuyo interior se encuentre el agua a una temperatura de consigna, de este modo, el funcionamiento del motor sería más continuo y con una regulación de carga más clara. Además resulta interesante la instalación de un controlador continuo de temperatura del estilo PID puesto que como se aprecia en los resultados referentes al factor de carga el control de temperatura establecido con un termostato no es suficiente provocando el arranque y

parada del motor sin una regulación de carga clara.

- Potencia de los radiadores sobredimensionada y regulación de caudal: según los resultados se ha llegado a la conclusión de que teniendo en cuenta que se trata de radiadores de baja temperatura y las necesidades energéticas de la vivienda no superan en casi ninguna ocasión la carga de diseño establecida sería posible la instalación de equipos de menor potencia máxima. Por otro lado, los radiadores instalados no permiten la regulación del caudal de agua circundante en su interior, lo que permitiría ajustarse de este modo de una forma más exacta a las necesidades energéticas.
- Potencia del motor y temperatura de consigna: aunque el motor escogido tenga una potencia térmica menor a la calculada como carga de diseño, el motor satisface con creces la demanda de la vivienda por lo que resulta interesante la instalación de un motor con una potencia menor en el caso de viviendas unifamiliares de estas condiciones. Actualmente, en el mercado la mayoría de los motores tienen potencias del orden al elegido en este proyecto por eso otra posible solución es la instalación de un motor para más de una vivienda y cuya potencia se adapte a las necesidades de dichos edificios.

## 8. AGRADECIMIENTOS

En la elaboración de este artículo quiero agradecer la ayuda y apoyo recibido por parte de las dos tutoras, Inés M<sup>a</sup> Suárez Ramón y M<sup>a</sup> Manuela Prieto González, que me han ayudado durante el desarrollo del trabajo, facilitándome información y medios para su realización además de orientarme en el desarrollo del mismo.



## 9. REFERENCIAS

- [1] Guía técnica: Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización.2012. IDAE-Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- [2] International Energy Agency. 2008. World Energy Outlook. Dirección URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/>
- [3] Código Técnico de la Edificación. 2013.
- [4] Documentación TRNSYS 17.2014.
- [5] "Proyecto SECH SPAHOUSEC: Análisis del consumo energético del sector residencial en España".2011. IDAE-Secretaría General Departamento de Planificación y Estudios.
- [6] Guía de la Microgeneración. 2008. Fundación Gas Natural Fenosa.
- [7] Apuntes asignatura: Exergía, termoeconomía y cogeneración. 2015. José M<sup>a</sup> Sala Lizárraga. Universidad del País Vasco
- [8] Guía Básica Microgeneración. 2012. Euroiberia Ingeniería S.L. opara la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- [9] Ventilación confortables de interior. Zehnder. Recuperadores de calor. Dirección URL: <http://www.zehnder.es/>
- [10] Radiadores de baja temperatura. Jaga España. Dirección URL: <http://www.jaga.info/>
- [11] Microgeneración Yanmar CP5WE. Himoina The Energy. Dirección URL: <http://www.himoina-cogeneration.com/cogeneracion/microcogeneracion.php>
- [12] C. Buratti, E. Belloni, D. Palladino, Evolutive Housing System: Refurbishment with new technologies and unsteady simulations of energy performance.2014.
- [13] Farraj F. Al-ajmi, V.I. Hanby, Simulation of energy consumption for Kuwaiti domestic buildings.2007