



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID)**

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

**Grado en Ingeniería Mecánica (GIM)**

---

**ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO  
RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN  
ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN  
EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS**

---

**Autor:** Carles Mahiques Bataller  
**Tutor:** Emilio José Sarabia Escrivà

Valencia, julio 2019



# **AGRADECIMIENTOS**

*“A mi familia y amigos.*

*A mi tutor Emilio,  
por guiarme en este trabajo.*

*A José Francisco, técnico de laboratorio,  
por su ayuda y conocimientos.”*



## **RESUMEN**

El sistema de climatización por suelo radiante tiene una serie de ventajas frente al resto de sistemas por lo que respecta al confort térmico. Pero el análisis del mismo en programas de simulación energética de edificios resulta complejo. El trabajo consiste en analizar el modelo de suelo radiante empleado por un modelo basado en simulación por eventos discretos (DEVS), desarrollado en la Universitat Politècnica de València (UPV), y comparar el comportamiento predicho con el que se obtiene en una instalación experimental.

Para ello el alumno desarrollará un sistema para la adquisición de datos del comportamiento de un suelo radiante construido en una instalación del laboratorio y comparará los valores obtenidos con los que se pueden obtener en una simulación por computador.

**Palabras clave:** suelo radiante, simulación energética de edificios, DEVS

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

## **ABSTRACT**

The radiant floor system for calefaction has a series of advantages in front of the rest of systems regarding thermal comfort. But the analysis of this in programs for energetic simulation of buildings is complex. The project consists on analysing the radiant floor model created by a model based on discrete event simulation (DEVS), developed at the Universitat Politècnica de València (UPV), and then compare the predicted behavior with the obtained in an experimental installation.

For this, the student will develop a system for the data acquisition of the behavior of a radiant floor built in a laboratory installation and compare the obtained values with those that can be obtained in a computer simulation.

**Keywords:** radiant floor, energetic simulation of buildings, DEVS

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---



**DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TRABAJO**

- Documento nº 1: MEMORIA
- Documento nº 2: PRESUPUESTO
- Documento nº 3: PLANOS

**ÍNDICE**

MEMORIA.....	9
1. Objeto .....	10
2. Introducción.....	10
3. Sistemas de calefacción más utilizados en viviendas .....	10
3.1 Clasificación según el generador de calor .....	10
3.1.1 Caldera a gas .....	11
3.1.2 Electricidad.....	12
3.1.3 Bomba de calor.....	13
3.1.4 Energía solar.....	15
3.2 Clasificación según el fluido caloportador .....	16
3.2.1 Agua .....	17
3.2.2 Aire.....	17
3.2.3 Refrigerante.....	18
3.3 Clasificación según la/s unidad/es terminal/es .....	19
3.3.1 Radiadores y convectores.....	19
3.3.2 Suelo radiante.....	20
3.3.3 Difusores .....	21
3.3.4 Sistemas autónomos .....	21
4. Calefacción por suelo radiante .....	23
5. Simulación energética de edificios .....	24
5.1 Fundamento físico del funcionamiento de la simulación .....	25
6. Instalación del laboratorio .....	28
6.1 Descripción de la instalación .....	28
6.2 Caracterización y descripción de los componentes .....	29
6.2.1 Caldera .....	29

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

6.2.2 Bomba .....	31
6.2.3 Cámara .....	32
6.2.4 Suelo radiante .....	33
6.3 Datos necesarios que registrar .....	33
6.3.1 Toma de datos .....	34
6.3.2 Equipo utilizado .....	34
6.3.3 Distribución termopares y montaje .....	35
6.3.4 Preparación cables termopar .....	37
6.4 Tarjeta de adquisición de datos: Configuración del programa .....	41
6.5 Montaje del caudalímetro .....	43
6.6 Modificaciones posteriores .....	45
6.6.1 Conexión del caudalímetro.....	45
6.6.2 Termopares modificados .....	48
7. Obtención y tratado de datos .....	49
7.1 Puesta a punto del sistema .....	49
7.2 Caldera y circuito de agua .....	49
7.3 Obtención de datos.....	51
7.4 Tratado de los datos obtenidos.....	52
7.5 Gráficos de los resultados de las experiencias.....	54
8. Resultados aplicados a la comprobación de modelos.....	59
8.1 DEVS .....	59
8.1.1 Cómo funciona en suelos radiantes .....	61
8.1.2 Configuración del modelo en DEVS y resultados obtenidos.....	62
9. Conclusiones y trabajos futuros.....	67
PRESUPUESTO.....	69
10. Presupuesto.....	70
10.1 Cuadros de precios unitarios.....	70
10.2 Costes por secciones .....	71
10.3 Coste total .....	76
PLANOS.....	77
13. Índice de planos .....	78
BIBLIOGRAFÍA .....	85

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Ilustración 1: Diagrama de la instalación del laboratorio.....	29
Ilustración 2: Caldera ISOFAST F 28E en la instalación.....	30
Ilustración 3: Bomba Sedical TF 140 en la instalación (circuito secundario).....	31
Ilustración 4: Bombas de rotor húmedo simples y dobles para calefacción y climatización. Recuperado de [7] .....	32
Ilustración 5: Tarjeta de adquisición de datos Agilent 34970A. ....	35
Ilustración 6: Soldadura de la unión termopar tipo K. ....	38
Ilustración 7: Instalación de los termopares en el interior de la cámara.....	38
Ilustración 8: Instalación de termopares en la impulsión y el retorno del agua. ....	39
Ilustración 9: Conexión de los termopares a la tarjeta de adquisición de datos. ....	40
Ilustración 10: Sistema de adquisición de datos.....	40
Ilustración 11: Configuración de la tarjeta de adquisición de datos.....	41
Ilustración 12: Configuración de los canales como termopares tipo k.....	42
Ilustración 13: Definición de intervalo entre mediciones.....	43
Ilustración 14: Caudalímetro SITRANS F M MAG 5100W.....	43
Ilustración 15: Bridas para la conexión del caudalímetro. ....	44
Ilustración 16: Configuración del caudalímetro en el programa. ....	47
Ilustración 17: Registro de datos incluyendo el caudalímetro.....	48
Ilustración 18: Consumo de la caldera. Recuperado de [6].....	50
Ilustración 19: Recuperación de los datos de las experiencias en Excel.....	52
Ilustración 20: Potencia en la experiencia nº 1.....	55
Ilustración 21: Temperaturas en la experiencia nº 1.....	55
Ilustración 22: Potencia en la experiencia nº 2.....	56
Ilustración 23: Temperaturas en la experiencia nº 2.....	56
Ilustración 24: Potencia en la experiencia nº 3.....	57
Ilustración 25: Temperaturas en la experiencia nº 3.....	57
Ilustración 26: Temperaturas en la experiencia nº 4.....	58
Ilustración 27: Esquema de funcionamiento de los elementos “Atomic”. Recuperado de [5] .....	60
Ilustración 28: Esquema de una estructura de resistencias-capacidades. Recuperado de [5] .....	61
Ilustración 29: Esquema de la estructura de resistencias-capacidades para la cámara del laboratorio.....	62
Ilustración 30: Gráfico con los resultados de la simulación de las temperaturas del suelo. ....	64
Ilustración 31: Gráfico con los resultados de la simulación de las temperaturas del aire. ....	64
Ilustración 32: Gráfico con los resultados de la simulación de las temperaturas de la pared. ....	65

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Precios de recursos personales. ....	70
Tabla 2: Precios de materiales. ....	70
Tabla 3: Precios de energías. ....	71
Tabla 4: Precios de equipos. ....	71
Tabla 5: Sección mano de obra.....	72
Tabla 6: Sección materiales. ....	72
Tabla 7: Consumos de electricidad.....	73
Tabla 8: Sección energías. ....	74
Tabla 9: Sección equipos. ....	75
Tabla 10: Coste total.....	76

**Documento nº 1:**

**MEMORIA**

## **1. Objeto**

El sistema de climatización por suelo radiante tiene una serie de ventajas frente al resto de sistemas por lo que respecta al confort térmico. Pero el análisis del mismo en programas de simulación energética de edificios resulta complejo. El trabajo consiste en analizar el comportamiento transitorio de una instalación con suelo radiante y comprobar los resultados obtenidos con modelos empleados en programas de simulación energética de edificios.

## **2. Introducción**

En la actualidad existen una gran variedad de sistemas de calefacción, pero cada sistema puede funcionar mejor según las características de la edificación en la que este se instala. En el caso de las viviendas en España, podemos clasificar los sistemas de calefacción según distintas consideraciones. Vamos a hacer una clasificación según el generador del calor, otra según el fluido caloportador y, por último, según la/s unidad/es terminal/es.

Tras esta clasificación seremos capaces de estudiar las ventajas y las desventajas de los distintos sistemas de calefacción instalados habitualmente o que más conviene instalar para viviendas, con lo que justificaremos la alta viabilidad de los sistemas de suelo radiante.

Seguidamente, explicamos el fundamento físico del problema de las simulaciones energéticas de edificios, para terminar este marco teórico introductorio y poder seguir con la memoria.

## **3. Sistemas de calefacción más utilizados en viviendas**

### **3.1 Clasificación según el generador de calor**

En esta clasificación nos centramos en la fuente de la que se obtiene el calor que es empleado en la calefacción. Analizamos aquellas fuentes capaces de transformar energía, del tipo que sea, en energía calorífica que se puede transmitir a un fluido caloportador para que transporte el calor a una zona diferente.

### 3.1.1 Caldera a gas

“Una caldera es un recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor o calentar agua, mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica. [...] El principio básico de funcionamiento de las calderas consiste en una cámara donde se produce la combustión, con la ayuda del aire comburente y a través de una superficie de intercambio se realiza la transferencia de calor.” [9]

Pese a que siempre serán contaminantes por funcionar por combustión, actualmente se están empezando a sustituir los combustibles, tanto sólidos como líquidos, por gas. El objetivo es conseguir calderas de mayor eficiencia y más limpias, que además conllevan menores costes para su mantenimiento.

Existen tipos de calderas, que se adecuan mejor dependiendo de las necesidades. En primer lugar, las calderas estándar, que trabajan a temperatura constante, y en las que no se produce condensación en humos. Seguidamente, también encontramos las calderas de baja temperatura, en las que encontramos menores temperaturas de retorno y que son adaptativas a la carga. Finalmente, las calderas de condensación, que reciben este nombre porque están pensadas para condensar la mayor parte del vapor de agua que se encuentra en los humos, gracias a esto es que se reducen en gran medida las pérdidas en este tipo de calderas.

En los distintos tipos de calderas el rendimiento es elevado, siendo en calderas estándar entorno al 75%, en calderas de baja temperatura entorno al 90%, y en las de condensación se puede incluso superar el 100%. Este rendimiento resulta de descontar las pérdidas del sistema, debidas a que las calderas no están totalmente aisladas y tienen pérdidas de calor por convección y radiación al ambiente y, por otra parte, las pérdidas debidas a la combustión incompleta y las pérdidas sensibles en humos.

Para que las pérdidas en humos, y las pérdidas de calor al ambiente por convección y radiación sean menores, se precisa de una baja temperatura de operación de la caldera.

Cuando se instala una caldera es recomendable instalar a su vez un depósito para el agua caliente que evite continuos arranques, pero este depósito suele ir ya equipado en las calderas. [1]

### Ventajas

La inversión inicial resulta económica. El rendimiento en estos sistemas es significativamente elevado. Calientan rápidamente el agua. Su instalación es muy simple, pues simplemente se sitúan en su posición, colgándose de la pared normalmente, y se conectan las entradas de gas y agua y salida de agua.

### Inconvenientes

Coste de mantenimiento moderado. Contaminante por la emisión de gases resultantes de la combustión. Necesitan un espacio ventilado y seguro para su ubicación.

### **3.1.2 Electricidad**

Primeramente, debemos tener en cuenta que el RITE limita la utilización de energía convencional, en este caso la electricidad, para la “fuente de calor mediante resistencias eléctricas por efecto Joule, en instalaciones centralizadas en los casos de apoyo a bombas de calor, apoyo a sistemas de energía renovable o residual, o sistemas de acumulación de calor que consuman energía en horas valle.” [8]

La manera de emplear la electricidad para la calefacción de una vivienda se basa en el empleo de resistencias que se calientan por el paso de la corriente eléctrica. Estas resistencias se pueden albergar en radiadores, bien siendo las emisoras del calor, o bien calentando un fluido caloportador que se distribuye uniformemente por el radiador. Estos últimos son los conocidos como radiadores de bajo consumo. Los radiadores son unos emisores radiantes, es decir, su forma de aportar calor es por radiación principalmente.

Otros dispositivos son los convectores, que emplean la electricidad para calentar un flujo de aire que los recorre por el interior, fluyendo por convección y calentando el local en el que se ubican. [10]

Finalmente, la electricidad puede utilizarse en calderas eléctricas, que calientan directamente agua, que puede ser empleada para sistemas radiantes o sistemas agua-aire. Estas calderas suelen tener un rendimiento superior a las que funcionan con gas, sin contaminar con su funcionamiento, y sin la necesidad de albergarse en un espacio ventilado. [11]



### Ventajas

Sólo es necesaria la existencia de red eléctrica en la vivienda, para lo que se puede emplear electricidad procedente de energías renovables. La instalación de los dispositivos eléctricos es muy sencilla; simplemente se deben situar en su posición con sus anclajes correspondientes y conectarlos a la red eléctrica. No necesitan un espacio ventilado. El mantenimiento de estos dispositivos es escaso y económico.

### Inconvenientes

Se necesita combinar con otros tipos de calefacción obligatoriamente, para el cumplimiento del RITE.

#### **3.1.3 Bomba de calor**

Una bomba de calor es un dispositivo que transfiere energía en forma de calor desde un medio o foco a baja temperatura a otro medio o foco a alta temperatura. En el caso de la calefacción, este foco caliente (condensador) se ubica en el interior de la vivienda para calentarla. El foco frío (evaporador) puede ser el aire ambiente, agua, el terreno, etc.

Estos dispositivos también son conocidos como refrigeradores, y funcionan mediante un fluido refrigerante que es bombeado desde una presión baja (medio a baja temperatura) a otra más alta (medio a alta temperatura).

Se trata de dispositivos cíclicos, que trabajan principalmente según el ciclo de compresión de vapor del fluido refrigerante, siendo el compresor usualmente movido por un motor eléctrico.

En estos dispositivos o máquinas, la eficiencia se mide según el coeficiente de operación (COP), que es el cociente entre el calor que se obtiene y el trabajo necesario para conseguirlo.

$$COP = \frac{\textit{salida deseada}}{\textit{entrada requerida}} = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

Distinguimos el coeficiente de operación en refrigeración ( $COP_R$ ), o más conocido como EER, del utilizado en bomba de calor ( $COP_{BC}$ ), siendo en refrigeración:

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{neto,en}} \quad (2)$$

Donde:

$Q_L$ : calor extraído del foco frío.

$W_{neto,en}$ : trabajo aportado a la máquina.

Y, por otra parte, en la bomba de calor:

$$COP_{BC} = \frac{Q_H}{W_{neto,en}} \quad (3)$$

Donde:

$Q_H$ : calor aportado al foco caliente.

$W_{neto,en}$ : trabajo aportado a la máquina.

Y como tenemos que el calor aportado al foco caliente será el calor extraído del foco frío más el trabajo aportado, también podemos expresar (3) como:

$$COP_{BC} = 1 + \frac{Q_L}{W_{neto,en}} = 1 + COP_R \quad (4)$$

Es decir, la eficiencia o coeficiente de operación en bombas de calor es superior a la unidad, y también usualmente el coeficiente de operación en refrigeración supera la unidad, por lo que el coeficiente de operación en bombas de calor será usualmente mayor que 2 (lo que sería una eficiencia mayor al 200%). [3]

### Ventajas

Reversibilidad entre producción de calor en los meses fríos y producción de frío en los meses cálidos. Coste de mantenimiento reducido. La eficiencia (coeficiente de operación) resulta excelente, prácticamente siempre superior al 100%. Posibilidad de controlar la humedad del aire.

### Inconvenientes

La inversión inicial es moderadamente alta. Se precisa de un espacio donde ubicar el intercambiador y compresor, y también en el interior se precisa de espacio en el falso techo (normalmente) para instalar los conductos de aire o las tuberías de refrigerante.

### **3.1.4 Energía solar**

Los dispositivos capaces de captar la radiación solar para convertirla en energía térmica que se puede emplear para elevar la temperatura de un fluido caloportador son los captadores solares. Este fluido suele ser agua glicolada, que se puede utilizar como ACS o para sistemas de calefacción.

Diferenciamos principalmente dos grupos: los colectores de alta temperatura y los colectores de baja temperatura. Los primeros son comunes en aplicaciones industriales, pero nos interesan los segundos, los colectores solares de baja temperatura, con un uso principalmente doméstico.

El funcionamiento de los colectores solares se basa en el efecto invernadero, aprovechando la radiación solar para calentar el fluido caloportador confinado en el interior de estos. [12]

En estos sistemas, si aumenta la temperatura de entrada del fluido al captador y disminuye la temperatura ambiente el rendimiento decrece. Por esta razón, para poder maximizar el rendimiento de la captación, las unidades terminales que pueden ser utilizadas en calefacción solar requieren bajo nivel térmico. Por ejemplo, se utilizan en grandes radiadores que funcionan a baja temperatura, o en suelos y paredes radiantes.

El rendimiento anual de estas instalaciones puede rondar el 25% para la combinación de climatización y ACS, aunque se llega al 80% de rendimiento en los captadores. Por criterios económicos, el aporte de estos sistemas no supera el 30% para la calefacción. De lo contrario, se deberían dimensionar instalaciones demasiado grandes y costosas para el simple hecho de calefactar una vivienda.

Adicionalmente en estas instalaciones se debe disponer un depósito de almacenamiento de agua caliente, para aumentar la inercia térmica del sistema. De lo contrario, los captadores podrían ser incapaces de proporcionar una continuidad de agua caliente, además de que sirven para almacenarla para la noche. Se consigue una disminución de la potencia instalada de equipos de producción, pero son necesarios periodos de funcionamiento largos. [1]

#### Ventajas

Esta manera de obtener energía es renovable por provenir de la radiación solar. El coste de mantenimiento es bajo en estos sistemas.

#### Inconvenientes

Temperatura de funcionamiento baja que sólo permite ser empleado en unidades terminales que funcionen a baja temperatura. Necesidad de un depósito para almacenar el agua calentada, que encarece la instalación.

### **3.2 Clasificación según el fluido caloportador**

Para los sistemas en los que es necesario el transporte de calor de un punto a otro, se utiliza un fluido caloportador, que es aquel que permite conducir el calor desde la producción hasta el aire interior a calefactar. Para la calefacción de viviendas, este fluido es agua, aire o refrigerante, dependiendo del tipo de sistema utilizado.

### **3.2.1 Agua**

Se puede utilizar agua como fluido caloportador en instalaciones con temperaturas superiores a 0°C, para evitar la congelación, e inferiores a 100°C, para evitar la evaporación.

Por tanto, se utiliza agua en sistemas de baja temperatura, como pueden ser suelos radiantes, radiadores o ventilo convectores, la cual puede ser calentada en una caldera, o en sistemas de bomba de calor agua-agua. Por otra parte, las bombas de calor también pueden ser agua-aire, siendo el agua calentada en la bomba de calor para luego calentar el aire.

#### Ventajas

Utilizar agua resulta muy económico. Alto calor específico y densidad en relación con el aire, que permite que las conducciones que la transportan, en este caso tuberías, sean de un diámetro relativamente pequeño.

#### Inconvenientes

Peligro de congelamiento o evaporación en las respectivas temperaturas de 0°C y 100°C (a presión atmosférica). Si se precisa de vapor o agua sobrecalentada habría que disponer de una instalación presurizada, que encarece el coste. Para trabajar a bajas temperaturas, se puede utilizar un anticongelante diluido, aunque hay que tener en cuenta si es tóxico y que aumenta la viscosidad del agua, para el diseño de la instalación y selección de la bomba que hace circular el agua. [13]

### **3.2.2 Aire**

El aire es el fluido caloportador en sistemas de bomba de calor aire-aire o agua-aire, en los que se recupera el calor del ambiente exterior, para ser transportado al interior. El modo de distribuir este desde la unidad exterior de la bomba de calor hasta el local o locales interiores a calefactar es por conductos, que se dimensionan para que el aire circule a la velocidad requerida en los distribuidores y que su presión sea la adecuada.[14]

### Ventajas

La humedad del aire que se transporta a los locales a calefactar puede ser controlada, para situarla en un nivel adecuado.

### Inconvenientes

El espacio para la instalación de los conductos de aire, normalmente en el falso techo de la vivienda, debe ser bastante amplio. También hay que tener en cuenta que estas instalaciones resultan costosas.

### **3.2.3 Refrigerante**

Se utiliza un refrigerante como fluido caloportador en las bombas de calor en las que se transporta el calor obtenido del ambiente exterior a los locales interiores de una vivienda, mediante tuberías que transportan el refrigerante, para ser cedido en sistemas autónomos.

Normalmente en viviendas se utilizan sistemas individuales con el evaporador en el exterior y el condensador en el interior para modo calefacción (estos pueden ser reversibles), por lo que el refrigerante realiza un circuito simple entre un elemento y otro, aunque podemos encontrar también sistemas VRF con más de un sistema autónomo en el interior.

### Ventajas

Reversibilidad del flujo de refrigerante para producir frío o calor. El espacio requerido para la instalación de las tuberías que lo transportan es reducido y la obra necesaria es mínima (agujeros en paredes o techos).

### Inconvenientes

Peligrosidad por fugas si el refrigerante es tóxico o destructor de la capa de ozono (sistemas antiguos) y/o por el coste de reemplazar el refrigerante perdido.

### **3.3 Clasificación según la/s unidad/es terminal/es**

Para terminar de clasificar los sistemas, elegimos en este apartado las unidades terminales instaladas habitualmente teniendo en cuenta el generador de calor utilizado y según el fluido caloportador.

#### **3.3.1 Radiadores y convectores**

Los radiadores son un tipo de sistema radiante. Se trata de un dispositivo metálico que distribuye el calor generado en su interior o que le llega mediante un fluido caloportador a la estancia en la que se encuentra, por radiación principalmente, aunque también en parte por convección.

En los casos en que el generador de calor es externo al radiador (caldera, captadores solares, bomba de calor), el calor llega desde el generador por un circuito de agua por tuberías. También existen los radiadores eléctricos, que generan el calor por efecto Joule en resistencias directamente, o calentando aceite que actúa como fluido caloportador y se circula por el interior del radiador.

Los convectores son unos dispositivos similares a los radiadores, pero su diseño favorece el flujo de aire del local en que están instalados a través de ellos, por lo que su manera de aportar calor es por convección principalmente. Es habitual que un circuito de tuberías los alimente con agua proveniente de uno de los generadores de calor como en el caso de los radiadores, aunque también existen eléctricos. [1]

#### Ventajas

Su instalación es sencilla; simplemente se sitúan en su posición, normalmente colgados de la pared, y se conectan con el circuito de agua que los abastece o a la red eléctrica. Para radiadores eléctricos, se pueden utilizar en las horas valle, en las que el precio del kWh es menor, y dejar que calefacten estando apagados, por su propia inercia térmica, en las horas punta, con mayor coste del kWh. [10]

### Inconvenientes

En los dispositivos eléctricos, si no se utiliza electricidad proveniente de fuentes renovables el coste de esta resulta elevado, debido a su consumo. Su temperatura de funcionamiento es elevada, normalmente superior a 50°C, lo que puede originar malestar térmico en los ocupantes del local en el que se instala.

### **3.3.2 Suelo radiante**

Un suelo radiante se trata de una red de tuberías que discurren bajo el suelo, por las que circula normalmente agua que se ha calentado previamente en un sistema externo, y que cede el calor al pavimento y desde este se transmite por radiación principalmente. Los suelos radiantes también pueden estar constituidos por un hilo eléctrico que se calienta por el paso de corriente, pero nos centraremos en el primer tipo, por ser el más habitual y el que existe en la instalación que vamos a analizar.

Estos sistemas son de baja temperatura, por lo que presentan grandes ventajas frente a otros tipos de calefacción. La sensación de confort que proporcionan estos sistemas es excelente, ya que el calor asciende desde el suelo hacia arriba, y la radiación hace que las superficies estén calientes, por lo que el efecto es duradero, ya que no calienta solamente el aire momentáneamente. [2]

Desarrollamos en más profundidad estos sistemas en el apartado correspondiente (Punto 4 de la Memoria).

### Ventajas

Baja temperatura de funcionamiento, que proporciona un alto confort térmico. Esto también permite que se puedan utilizar captadores solares para calentar el agua que utilizan (energía renovable). No ocupan espacio con elementos de difusión de calor, ya que la instalación se encuentra bajo el suelo en su totalidad.



### Inconvenientes

Elevado coste de la instalación, por lo que se debe instalar durante la obra de la vivienda o en una reforma posterior.

### **3.3.3 Difusores**

En las bombas de calor en que el aire es transportado desde estas a los locales a calefactar (sistemas aire-aire o agua-aire), los difusores son los elementos situados en los extremos de las conducciones y que distribuyen el aire a los locales.

La geometría de estos elementos, así como la diferencia de temperaturas entre el aire impulsado y el del local, o las condiciones del propio local, son los aspectos que los caracterizan. Hay que estudiar su alcance para realizar la distribución óptima que implique menor número de difusores.

### Ventajas

Son unos elementos económicos y de fácil instalación. En la mayoría de los casos su orientación es regulable.

### Inconvenientes

Una deficiente distribución de los difusores en un local puede generar corrientes de aire que provoquen malestar en los ocupantes, o una inadecuada renovación del aire.

### **3.3.4 Sistemas autónomos**

Llamamos sistemas autónomos a condensadores (en el caso de calefacción) instalados en el interior del local a calefactar. Se trata de dispositivos que reciben un refrigerante desde el evaporador situado en el exterior, y que extrae el calor de ese ambiente externo para transportarlo al interior.

## ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

---

Estos dispositivos suelen ser reversibles. Concretamente, los sistemas autónomos se instalan generalmente para refrigerar, pero en los meses fríos se pueden utilizar también para calefactar los locales interiores de la vivienda.

Se trata de bombas de calor, que como ya se ha explicado, resultan muy eficientes, sobre todo en modo calefacción, con una eficiencia (coeficiente de operación) normalmente superior a 2 (200%).

### Ventajas

Son sistemas reversibles entre refrigeración y calefacción. Su eficiencia (coeficiente de operación) es muy buena. La instalación de estos elementos es simple, aunque requiere de perforaciones en paredes o techos para situar las tuberías de refrigerante.

### Inconvenientes

Son dispositivos moderadamente costosos si se instalan individualmente en cada local. La instalación la deben realizar profesionales, para asegurar la estanqueidad de esta, que evite fugas de refrigerante, y habiendo calculado la potencia necesaria a instalar.

## **4. Calefacción por suelo radiante**

Como comentábamos en el apartado de la clasificación por unidades terminales, vamos a centrarnos para este trabajo en los suelos radiantes que constan de una instalación con tuberías por las que fluye agua, excluyendo los de resistencias eléctricas.

Estas instalaciones se realizan normalmente con tuberías de polietileno, que discurren bajo el pavimento y sobre un mortero, y guiadas por unos elementos prefabricados de material aislante llamados tetones, gracias a los que toman la forma adecuada que ha sido estudiada para calefactar de la mejor forma cada local por los que circula. También resulta muy importante disponer una banda perimetral, que permite la dilatación del mortero porque lo separa del solado de la pared. [2]

Pero, como comentamos, el suelo radiante se encuentra bajo el pavimento, por lo que para disponerlo se debe ejecutar su instalación al construir la vivienda o en una reforma posterior. Si se decide instalar desde un principio, resulta mucho más económico que en una reforma posterior, en la que se debería sustituir todo el pavimento para poder situar las tuberías en su lugar, y luego volver a pavimentar. Es por ello que en la vivienda se ahorra espacio ya que no existen unos elementos terminales en el interior de los locales para difundir el calor, como pudieran ser radiadores o convectores, equipos autónomos, etc., los cuales restan un cierto volumen a la estancia.

Se caracterizan por ser sistemas que trabajan a bajas temperaturas, pues el agua circula entre 30°C y 40°C. Esto los diferencia, por ejemplo, de los radiadores, en los que el agua puede estar circulando al doble de temperatura, por lo que la eficiencia de los suelos radiantes es muy buena, consiguiendo elevados rendimientos en las caldera que le proporciona el agua caliente, o en la bomba de calor, según el caso.

Como están instalados en el suelo, los suelos radiantes calientan desde abajo hacia arriba, por radiación, pero también por convección por el aire del local que está en contacto con el suelo. Gracias a esto, el confort térmico que proporcionan estos sistemas es excelente, encontrándose los pies incluso más calientes que la cabeza de los ocupantes. En principio, la corriente de aire favorecida por la convección evita que el aire se estratifique, con menores temperaturas abajo que arriba del local. Pero la inercia térmica de estos sistemas resulta elevada, precisando de transitorios de incluso algunas horas para calentar las estancias desde la temperatura a la que se encuentran a una temperatura adecuada para el confort de los ocupantes, aunque el transitorio tras apagar el sistema también se extiende

unas horas, por lo que sigue irradiando calor. Este es uno de los factores que influyen en su control, que resulta complejo, pues se necesita ajustar el generador de calor, planificar los encendidos y apagados para mantener la temperatura adecuada en el momento deseado, y con los termostatos necesarios, partiendo además de la base de que el sistema haya sido diseñado correctamente.

Por otra parte, la simulación de sistemas de suelo radiante en programas de simulación energética de edificios resulta problemática. Cada elemento se debe definir por sus propiedades geométricas y físicas, para conseguir el mismo comportamiento o la mejor aproximación al sistema real que se está modelando.

En conjunto, la inercia térmica debe resultar elevada, como en la realidad, por lo que una simulación energética de este tipo de sistemas debería resultar en un régimen transitorio extenso para luego llegar a un régimen permanente estable, en una temperatura adecuada para el confort térmico.

Por otra parte, las características de las tuberías, como pueden ser su longitud, diámetro interior y exterior, y material, es muy importante que se definan correctamente, así como el caudal de agua y la temperatura de entrada de esta.

## **5. Simulación energética de edificios**

La simulación energética de edificios es una herramienta que ha incrementado su manejo en el sector de la edificación desde que se ha tomado mayor conciencia de la necesidad de ahorro energético. El análisis energético permite diferentes usos: diseño de edificios más eficientes energéticamente, diseñar una instalación de climatización, analizar una instalación existente para caracterizarla, mejorarla o renovarla, estudiar el comportamiento térmico de un edificio, etc.

En este capítulo se pretende explicar los fundamentos físicos del análisis energético de edificios, basándonos en [4].

Cuando se crea una simulación por ordenador se pretende modelar un objeto físico para predecir su comportamiento de manera virtual, sin realizar ninguna acción con el objeto real. En el pasado, el tiempo que transcurría entre dos eventos, el tiempo de muestreo, era

fijo (simulación en tiempo discreto), y era la metodología empleada por los programas de simulación energética de edificios.

Actualmente, la mayoría de programas de simulación energética realizan análisis para incrementos de tiempo constantes. La nueva metodología planteada por algunos profesores de la UPV [5] pretende utilizar el concepto de simulación por eventos discretos (DEVS, del inglés “Discrete Event Simulation”) para realizar análisis térmicos.

La velocidad de cálculo alcanzada con esta nueva simulación, manteniendo la precisión, respalda el uso y desarrollo de esta nueva metodología.

Este tipo de simulación por eventos discretos es la que vamos a abordar para el estudio de la instalación de suelo radiante objeto del proyecto. En este trabajo comprobaremos el ajuste de un modelo de la instalación de laboratorio que utiliza esta metodología (la programación del modelo no pertenece al trabajo) comparando los resultados con los obtenidos experimentalmente con el sistema de adquisición de datos diseñado.

### **5.1 Fundamento físico del funcionamiento de la simulación**

Para el estudio físico de los objetos que vamos a analizar (en este caso, las distintas superficies de la cámara) mediante programas de simulación energética, se utilizan balances de energía o, más bien, balances de las densidades de flujo de energía. Mediante esta metodología podemos llegar a realizar un modelo que calcule la temperatura del aire, para las condiciones de la cámara y con la aportación de calor por parte del sistema de suelo radiante.

Un balance de energía toma un volumen muy pequeño de cada superficie y próximo a esta, para reducirlo a cero. De esta manera se fuerza a que los flujos de energía continúen su curso, porque se consigue que sobre la superficie no se llegue a acumular la energía.

Estos balances de energía debemos hacerlos para todas las superficies, tanto exteriores como interiores, para finalmente plantearlo en el volumen total. Teniendo en cuenta, en el caso del volumen, si hay aportaciones por su contorno y si en el volumen existe acumulación.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

Cada una de estas superficies, que conforman un local, tiene asociado un objeto físico, y es sobre este que se hace un balance de energía de la forma [4]:

$$q_{cond,j} = q_{rad,j}^{ol} + q_{rad,j}^{oc} + q_{conv,j} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5)$$

En la que se reflejan los flujos asociados a la superficie “j”.

Es decir, el flujo calor que se transmite por conducción a través de una superficie ( $q_{cond,j}$ ) se transmite por radiación de onda larga ( $q_{rad,j}^{ol}$ ) y onda corta ( $q_{rad,j}^{oc}$ ) y también por convección al aire ( $q_{conv,j}$ ) cuando termina de recorrer la superficie (pared, suelo o techo) por conducción y llega al nodo superficial, en contacto con el aire.

Estos flujos de calor son dependientes de la temperatura, por lo que podemos especificar más la ecuación para poder verlo más claramente [4]:

$$q_{cond,Local-j}(T_j^{Local-v}, T_j^{Local}) = q_{rad,Local-j}(T_1^{Local}, T_2^{Local}, \dots, T_N^{Local}) + q_{rad,Local-j}^{oc} + q_{conv,Local-j}(T_{Local}, T_j^{Local}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6)$$

En la que:

Local: es el volumen del espacio que estamos analizando

$T_{Local}$ : es la temperatura seca asignada al aire asociado al volumen del espacio

$T_{Local-j}$ : es la temperatura asignada a la superficie “j” del local

Local-v: es el local colindante o el exterior

Por otro lado, a la hora de evaluar esta expresión sobre esa superficie “j”, se debe tener en cuenta su área, aplicando el objeto físico sobre el geométrico, por lo que tenemos [4]:

$$Q_{cond,Local-j}(T_j^{Local-v}, T_j^{Local}) = A_j \cdot q_{cond,Local-j}(T_j^{Local-v}, T_j^{Local}) \text{ [W]} \quad (7)$$

Y expandiendo la expresión anterior, para lo que se asume la aproximación lineal del intercambio radiante infrarrojo [4]:

$$\begin{aligned}
 Q_{cond,Local-j}(T_j^{Local-v}, T_j^{Local}) &= \\
 &= A_j \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot \left( \sum_{i=1, i \neq j}^n B_{j,i} \alpha_{rad,j,i}(T_j^{Local}, T_i^{Local}) \right) + \\
 &+ A_j \cdot q_{rad,Local-j}^{oc} + A_j \cdot h_j \cdot (T_j^{Local} - T_{Local}) \text{ [W]}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Cuando se quiere determinar la cantidad de energía que se transmite al aire del interior del local para, mediante la temperatura seca, controlar su ambiente, lo que hacen los métodos de simulación es tratar de eliminar aquellos términos del sumatorio que contienen la energía radiante entre superficies, para buscar una relación que sea más directa entre las superficies (paredes) y el aire.

## **6. Instalación del laboratorio**

### **6.1 Descripción de la instalación**

La cámara con la instalación de suelo radiante que estamos estudiando se encuentra en el interior de un laboratorio en la UPV (Campus de Vera, València). Esto reduce la variabilidad de la temperatura exterior de la cámara, que es la del interior del laboratorio, por lo que resulta bastante estable y nos facilita el estudio de los resultados, además de lograr un ambiente más controlado.

Esta cámara está compuesta por paneles sándwich en paredes y techo de gran espesor, que proporcionan un alto aislamiento de la misma, y el suelo es en su totalidad suelo radiante.

La instalación del suelo radiante consta del propio sistema de tuberías bajo las baldosas del interior de la cámara, las tuberías de impulsión y retorno a un depósito que es a su vez un intercambiador de calor entre el suelo radiante y la caldera junto con las tuberías que la conectan con el depósito. La disposición de válvulas que se adopta para el funcionamiento del suelo radiante ofrece dos circuitos cerrados. El circuito primario es el que circula por la caldera y absorbe el calor que ésta proporciona y, mediante un sistema de tuberías, llega al depósito. A este, se conecta por otra parte el circuito secundario, que es el del suelo radiante, que mediante una bomba está en continua circulación absorbiendo calor del circuito primario en el depósito y llevándolo al interior de la cámara, donde lo cede.

A continuación apreciamos en una representación esquemática, un diagrama, que muestra los componentes principales de esta y como están conectados entre sí (Ilustración 1).



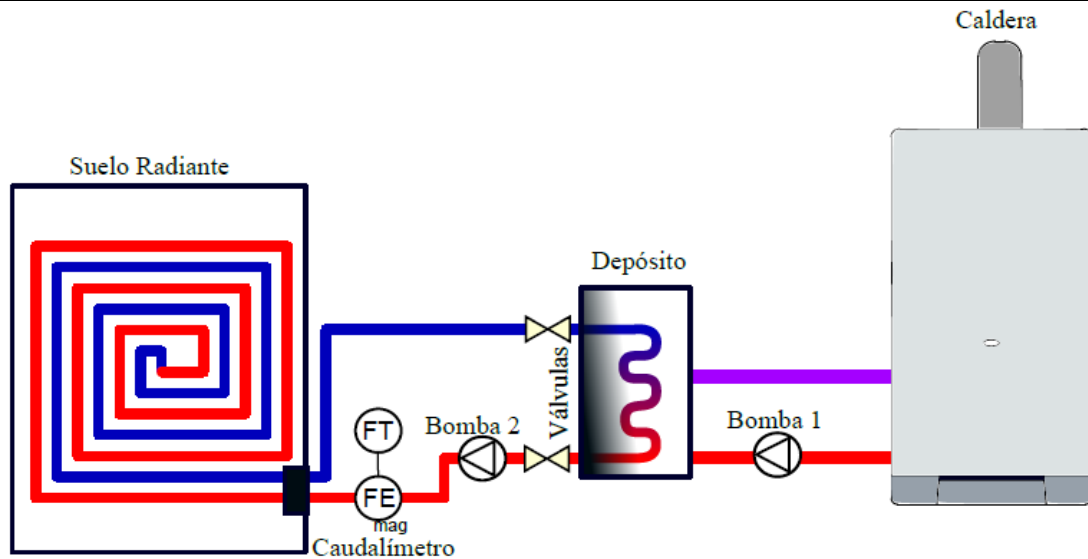


Ilustración 1: Diagrama de la instalación del laboratorio.

En este diagrama, distinguimos la “Bomba 1” de la “Bomba 2”, siendo las del circuito primario y el secundario, respectivamente. Se muestran también las válvulas del circuito secundario que permiten cerrar el paso de agua hacia el depósito o saliendo del mismo. La forma que siguen las tuberías en el suelo radiante es simplemente esquemática, puesto que no se conoce su distribución real.

El agua que se bombea desde la caldera inunda el depósito, y vuelve a esta por otra tubería; mientras que el agua que circula por el circuito secundario sigue un serpentín por el interior del depósito para recibir el calor que luego cederá al sistema de suelo radiante.

## 6.2 Caracterización y descripción de los componentes

### 6.2.1 Caldera

La caldera encargada de proporcionar la potencia necesaria para el funcionamiento del suelo radiante es la ISOFAST F 28 E (Ilustración 2).

Esta es una caldera de tipo atmosférico, que puede tomar el aire necesario para la combustión del local donde están instalada, aunque en este caso la evacuación de los productos de la combustión y la entrada de aire para la misma se realizan a través de dos

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

ventosas concéntricas (aprovecha el calor cedido al ambiente de los gases de salida para precalentar el aire de entrada) que comunican con el exterior del laboratorio. Se trata de un aparato de circuito estanco.

Esta es una caldera de doble servicio, que equipa un sistema de modulación que le permite proporcionar calefacción y agua caliente instantánea, con una potencia variable entre 10,7 kW y 27,6 kW.

La categoría del gas con el que funcionan es II2H3+, por lo que pueden funcionar con gas natural (G20), butano o propano (G30/G31). En este caso estamos utilizando gas natural de la red instalada en la universidad.



Ilustración 2: Caldera ISOFAST F 28E en la instalación.

La información de las características de la caldera ha sido obtenida de [6].

### 6.2.2 Bomba

La bomba del circuito secundario es la Sedical SP 32/8-B (Ilustración 3). Según el fabricante “la serie SP 32/8 lleva algunos años desactualizada. La que la sustituye es la A30/8-B. La diferencia entre ambas principalmente es que la nueva lleva incorporado variador de frecuencia, con lo cual se ajusta al punto de demanda de la instalación.”.

Podemos estudiar la curva característica de esta segunda bomba (Ilustración 4), y si determinamos el caudal que trasiega por el circuito secundario, que recorre el suelo radiante, mediante un caudalímetro, podremos determinar la altura de presión a que está sometida que, por ser un circuito cerrado, debería ser muy baja, ya que se debe sólo a pérdidas. Esto es así porque en la ecuación de Bernoulli se cancelan todos los términos de altura por diferencia de cotas, por velocidad y por presión, quedando solamente las pérdidas.



Ilustración 3: Bomba Sedical TF 140 en la instalación (circuito secundario).

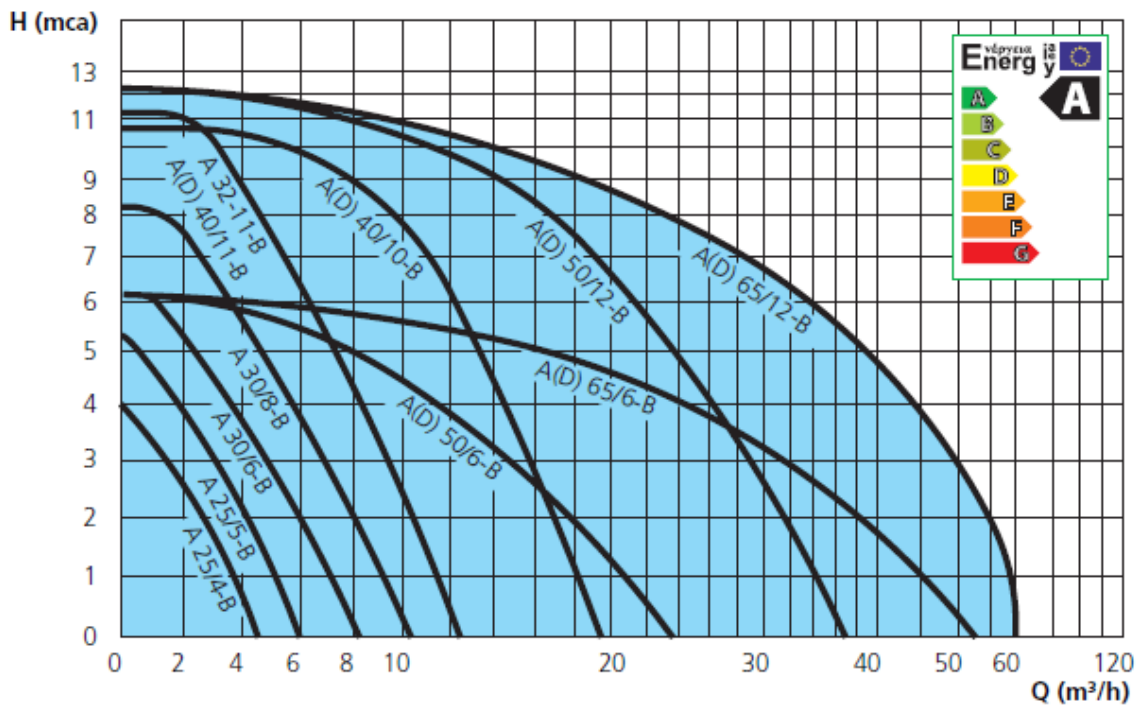


Ilustración 4: Bombas de rotor húmedo simples y dobles para calefacción y climatización. Recuperado de [7]

### 6.2.3 Cámara

La cámara que alberga el suelo radiante se trata de una pequeña habitación de lados 3'75 m y 2'30 m, con una altura de 2'10 m (Cotas referidas al interior de la cámara). Sus paredes y techo están compuestos de paneles aislantes tipo sándwich de 7'5 cm de espesor. En la pared frontal se ubica una puerta, del mismo material, y perfectamente sellada en las juntas.

En el interior, se observan paredes con reparaciones debidas a agujeros por la anterior utilización de sistemas de climatización para el ensayo de la cámara, pero debidamente sellados con el mismo material aislante.

Las dimensiones se pueden observar en los planos, para una mejor comprensión.

#### **6.2.4 Suelo radiante**

El suelo radiante ocupa toda la superficie inferior del interior de la cámara, por tanto de 3'75 m x 2'30 m, de lo que resultan 8'63 m<sup>2</sup>.

En cuanto a la composición del suelo, de arriba a abajo, encontramos en primer lugar un enlosado de terrazo de 3cm de espesor, una capa de cemento de 3cm, una chapa metálica de 5mm, una capa de plástico separadora y por último el sistema de tuberías que conforman el suelo radiante. Bajo esto ya encontramos el forjado del suelo del laboratorio.

Las baldosas de terrazo constan de un conglomerado de piedras entre las que se encuentra el mármol, unidas por cemento.

La tubería que conforma el suelo radiante, que podemos observar en la entrada/salida al mismo, es plástica y de  $\varnothing_{\text{exterior}}$  14,5 mm y de  $\varnothing_{\text{interior}}$  10,5mm.

La longitud es desconocida. No obstante, esperamos poder obtener su distribución al tomar distintas temperaturas del suelo, si llega a haber zonas con temperaturas claramente diferenciadas por su posible cercanía a la tubería de impulsión (más T<sup>a</sup>) o a la de retorno (menor T<sup>a</sup>).

Como anotación, podemos comentar que tratamos de distinguir el trazado que sigue la tubería bajo el suelo iniciando la caldera a una elevada potencia y enfocando al suelo con una cámara termográfica, pero sin resultados. La elevada inercia térmica del sistema lleva a que todo el suelo se caliente a la vez, sin dejar zonas a distinta temperatura, además que la diferencia de temperaturas es muy baja, de unos pocos grados, al trabajar a baja temperatura el suelo radiante.

#### **6.3 Datos necesarios que registrar**

Para realizar el estudio del comportamiento de la instalación principalmente necesitamos recoger unas medidas de temperaturas y caudal de agua. Concretamente, debemos diseñar un sistema de toma de datos que sea capaz de registrar temperaturas en distintas partes de la superficie interior de la cámara, esto es, del suelo, paredes y techo, y la temperatura del

aire en el interior. Por otra parte, la temperatura exterior, en este caso la del laboratorio en el que se encuentra la cámara y, finalmente, las temperaturas de impulsión y retorno del agua del circuito secundario, que es el que circula por el suelo radiante.

Con todo esto, podemos analizar la evolución de temperaturas en el suelo, desde el cual se transmite la potencia que le llega del agua, por radiación al resto de superficies interiores de la cámara y por convección al aire interior de esta; la evolución de temperaturas de paredes y techo, y la del aire en el interior de la cámara.

Por otra parte, con los datos de temperaturas del agua registrados antes y después de su circulación por el suelo radiante, junto con la medición del caudal, podemos calcular la potencia que está proporcionando el sistema de suelo radiante.

### **6.3.1 Toma de datos**

Con el objetivo de obtener los parámetros necesarios para el estudio, a ser posible registrados en un largo periodo de tiempo para dar suficiente tiempo a que se desarrolle el régimen transitorio del sistema y llegar a un régimen de funcionamiento estable, creemos útil utilizar una tarjeta de adquisición de datos, disponible en laboratorio, la cual proporciona un gran número de entradas que pueden corresponder a lecturas de temperatura repartidas por el sistema y la cámara. De este modo, probamos la realización de las lecturas mediante termopares que, de dar buenos resultados, serán el sistema definitivo para la adquisición de datos.

### **6.3.2 Equipo utilizado**

En el laboratorio, como se comentaba previamente, disponemos de una tarjeta de adquisición de datos, en concreto el modelo 34970A de Agilent (fabricante HP) (Ilustración 5).



Ilustración 5: Tarjeta de adquisición de datos Agilent 34970A.

Esta tarjeta dispone de 20 entradas de tensión y 2 más de corriente. Esto nos conviene para el sistema de obtención de datos que queremos diseñar, ya que podemos utilizar todas las entradas de tensión para registrar temperaturas mediante termopares y, por otra parte, la posibilidad de registrar los datos de caudal desde un caudalímetro.

También, disponemos de unos rollos de termopar tipo K pueden ser utilizados para la lectura de temperaturas, tanto de superficies interiores de la cámara, suelo, aire exterior e interior, e impulsión y retorno del agua.

### 6.3.3 Distribución termopares y montaje

Para conseguir registrar el mayor número de puntos distintos del interior de la cámara, pensamos una distribución en la que el suelo incluye 4 termopares, 3 más en cada pared grande, esto es, las dos que miden 3,75 m de largo, y 2 termopares en cada pared pequeña. El techo albergará otros 3 termopares, y situamos un último termopar en el centro de la cámara, para el registro de la temperatura del aire. Esta distribución es la más homogénea posible para tratar de recoger de la mejor manera datos de toda la cámara, con el número disponible de termopares.

Aquí mencionamos la utilidad de los planos en este proyecto. En ellos, podemos identificar la posición elegida para cada termopar, señaladas como “TX”, siendo T de temperatura y X el número del termopar en cuestión.

## ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

---

Empezando por el suelo, dividimos la dimensión más larga (3,75 m) en 3 partes iguales de 1,25 m, y la dimensión corta (2,3 m) en 3 partes iguales de 0,77 m. En las cuatro intersecciones provocadas por estas divisiones se sitúan los 4 primeros termopares, identificados de T1 a T4. [Plano nº 1].

El techo queda dividido en la dimensión más larga en 4 partes de 0,94 m y en la corta en 2 partes de 1,15 m (en la mitad). En un primer momento, como comentábamos, situamos 3 termopares en las tres intersecciones que provocan estas divisiones, aunque finalmente queda reducido a 2 termopares en el techo, T17 y T18, para así disponer de un termopar que mida la temperatura del aire interior. [Plano nº 2].

Las dos paredes grandes, que son la frontal que contiene la puerta y la pared trasera, las dividimos en la dimensión más larga (3,75 m) en 3 partes de 1,25 m y en la dimensión corta (en este caso la altura, 2,1 m) en 3 partes de 0,7 m. Las intersecciones provocadas por estas divisiones determinan la ubicación de los termopares en el nivel inferior de estas dos paredes. Para la pared trasera T5 y T6, y para la frontal T9 y T10. En el nivel superior dividimos la dimensión larga en 2 partes de 1,875 m. En estas nuevas intersecciones, el centro de las paredes, situamos los termopares T7 (pared trasera) y T11 (pared frontal). [Planos nº 3 y nº 4].

Con esto estamos consiguiendo dos niveles más de medición de temperatura en la altura, a parte del nivel del suelo y el del techo que ya tenemos. Si se produce estratificación del aire en el interior de la cámara, con distintas temperaturas del aire según la altura, seremos capaces de detectarlo, al estar registrando 4 niveles de temperaturas en altura. Desconocemos en un primer momento si se va a producir este efecto, ya que no existe ventilación de la cámara ni elementos que promuevan el movimiento del aire.

Finalmente, para las dos paredes laterales, dividimos el ancho (2,3 m) en 2 partes iguales de 1,15 m y la altura en 3 partes de 0,7 m. En las intersecciones provocadas también situaremos los termopares, T13 y T14 en la primera y T15 y T16 en la segunda. [Planos nº 5 y nº 6].

Por otra parte, en la impulsión (T8) y retorno (T12) del agua disponemos 2 termopares para la lectura de su temperatura, dentro de unas finas tuberías que actúan como sonda, entrando perpendicularmente a la dirección del flujo del agua y midiendo la temperatura



del centro del flujo. En el interior, colgamos un termopar (T19) del techo para medir la temperatura del aire, aproximadamente al centro de la cámara. Ubicamos un último termopar (T20) en el exterior de la cámara, pero dentro del mismo laboratorio, para registrar la temperatura exterior de la cámara.

Una vez elegida la distribución, procedemos con la preparación de los termopares, situada ya la tarjeta de adquisición de datos en una posición adecuada, junto con el ordenador que va a estar guardando los datos, en una mesa situada en el exterior de la cámara, al lado de la puerta de entrada a esta. Esta disposición minimiza la longitud de los cables termopar que discurren desde la tarjeta hasta el interior de la cámara, economizando el sistema de registro de datos y reduciendo errores por longitud de los cables termopar.

En primer lugar, practicamos un agujero a la cámara por el que puedan pasar todos los termopares que vayan a trabajar en el interior, comprobando el tamaño necesario para esto.

En este momento, ya podemos tomar cada cable termopar y situarlo desde donde se conecta a la tarjeta de adquisición de datos, hasta su posición en el interior de la cámara, tratando de dejarlos bien recogidos y ocupando el menor espacio posible, para el ahorro de cable y una distribución más ordenada.

#### **6.3.4 Preparación cables termopar**

Con la instalación ya preparada para la distribución de los termopares, empezamos su colocación tomando el punto donde se va a instalar cada termopar, planteamos por donde va a discurrir hasta la tarjeta de adquisición de datos y cortamos con esta longitud.

A continuación, preparamos la unión en el extremo del cable interior de la cámara, el que realizará las medidas de temperatura. Para ello, pelamos el cable exterior que contiene los dos cables NiCr-CrAl. Pelamos ahora estos con delicadeza para evitar cortar hebras y dejando sólo una pequeña longitud de cable descubierto, tratando de minimizar errores posteriores en la medición por defectos en las zonas de soldadura. Entrelazamos los dos cables y procedemos con la soldadura de estaño. Es muy importante que la soldadura nos quede lo más limpia posible y la cantidad de estaño que empleamos en la unión sea la

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

mínima necesaria, para evitar posibles errores en las medidas. En la Ilustración 6 podemos observar este procedimiento.



Ilustración 6: Soldadura de la unión termopar tipo K.

Una vez soldado, podemos situar el termopar en su posición de medida (Ilustración 7) y procedemos con su instalación hasta la tarjeta de adquisición de datos. Para ello, empleamos cinta adhesiva tipo “Cinta Americana” por su versatilidad y resistencia para mantener fijos los cables, sobre todo los que se instalan en paredes y techo para evitar que se despeguen y caigan.



Ilustración 7: Instalación de los termopares en el interior de la cámara.

El siguiente paso consiste en pasar los cables termopar uno a uno por el agujero practicado en la pared de la cámara, tratando de que no resulten dañados, pero los dejamos ajustados

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

al agujero, para evitar pérdidas de calor al exterior. Rematamos sellando el agujero con cinta para cubrir los pequeños espacios libres.

Los dos termopares que van a medir las temperaturas de impulsión y retorno del agua, como comentábamos, vamos a introducirlos en unas finas tuberías que llegan al centro de las tuberías de impulsión y retorno, con el extremo cerrado obviamente, para que no escape el agua del circuito por estos puntos. Para instalar estos termopares, los impregnamos en una silicona o pasta térmica (RS PRO Silicone Grease 100g Tube 494-124) para asegurar que existe contacto entre el termopar y la tubería, y que la transmisión de calor se produzca por conducción, para medir correctamente la temperatura del agua. Aseguramos el termopar en esta posición con un poco de cinta, para que no escape de dentro de la tubería, como muestra la siguiente imagen con su instalación finalizada (Ilustración 8).



Ilustración 8: Instalación de termopares en la impulsión y el retorno del agua.

Finalmente, conectamos los termopares a los puertos deseados de la tarjeta de adquisición de datos. Para esto, pelamos el extremo exterior de cada cable termopar del mismo modo que el extremo interior (dentro de la cámara). A continuación, extraemos la tarjeta de adquisición de datos del Agilent, y abrimos su tapa retirando un tornillo que la sella. Para conectar los termopares, aflojamos los tornillos de cada clavija, un positivo y un negativo por cada puerto de entrada.



Ilustración 9: Conexión de los termopares a la tarjeta de adquisición de datos.

En la Ilustración 9 observamos como quedan conectados los cables termopar a la tarjeta de adquisición de datos en los puertos seleccionados para cada medida. Para esto, la polaridad a respetar para la correcta medida de temperaturas (signo correcto) es el cable de Níquel-Cromo (verde) al positivo y el de Cromo-Aluminio (blanco) al negativo.

Sólo uno de los termopares está calibrado, así que esperamos al momento de realizar la primera prueba de medida de temperaturas para determinar si las temperaturas registradas se ajustan suficientemente o habría que desmontar todos los termopares de la cámara para introducirlos en un baño de agua a una determinada temperatura para calibrarlos.

Cuando terminamos con la instalación del sistema de adquisición de datos, el aspecto que tiene es el que muestra la Ilustración 10.

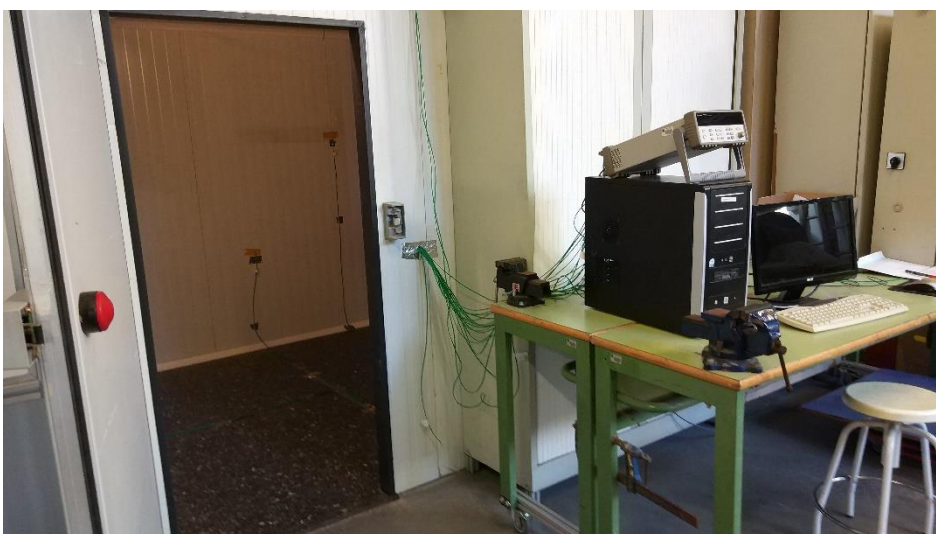


Ilustración 10: Sistema de adquisición de datos.

# ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

En la imagen apreciamos la mesa que se sitúa en el exterior de la cámara y que soporta el ordenador, con sus periféricos correspondientes, y la tarjeta de adquisición de datos sobre el mismo. Se aprecian los cables termopar discurriendo desde sus posiciones hasta la parte trasera de la tarjeta de adquisición de datos, donde se conectan.

## 6.4 Tarjeta de adquisición de datos: Configuración del programa

Una vez hemos instalado los cables, nos queda configurarlos en el programa que controla la tarjeta de adquisición de datos, el software: BenchLink Data Logger 3, disponible para instalar con la tarjeta de adquisición de datos.

Primero, conectamos la tarjeta al ordenador por vía cable RS 232 de registrador de datos y el programa detecta la tarjeta y simplemente la seleccionamos para indicarle que es con la que estamos trabajando (Ilustración 11).

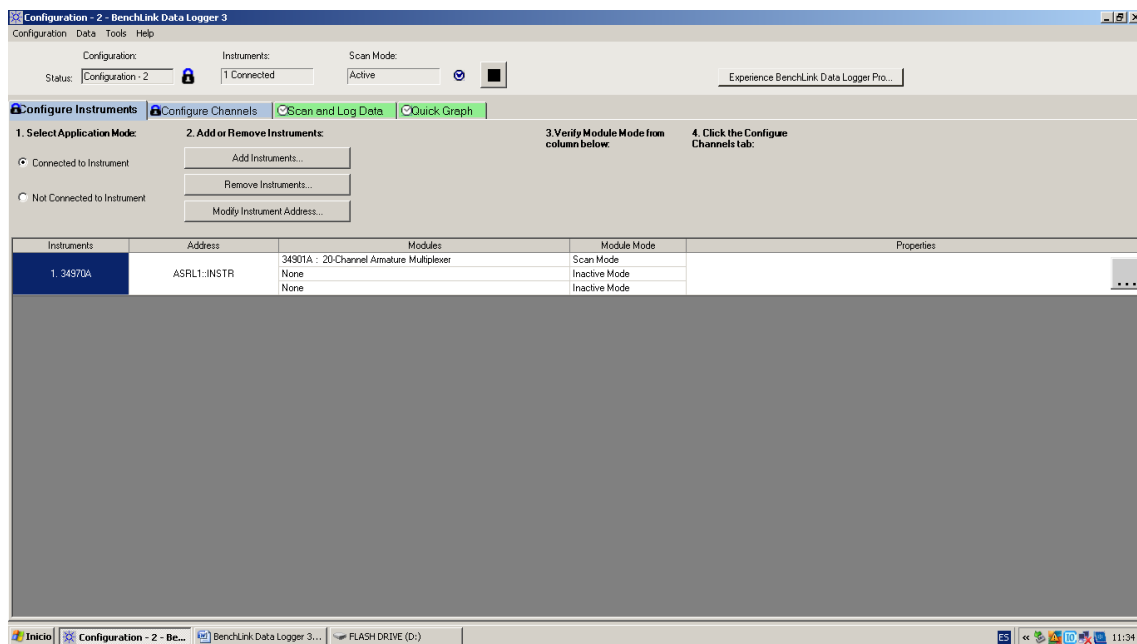


Ilustración 11: Configuración de la tarjeta de adquisición de datos.

Ahora, desde la pestaña “Configure Channels”, de configuración de canales, nombramos cada termopar en el programa según la superficie o lugar en que está instalado y un número que lo identifica (Ilustración 12), con la misma numeración que explicamos en el apartado anterior y a la que se refieren los planos, y se selecciona la opción de medición de temperatura mediante termopar de tipo k. Con esto, quedan configurados todos los

# ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

canales a los que se han conectado los termopares para lectura de temperatura mediante termopar tipo k.

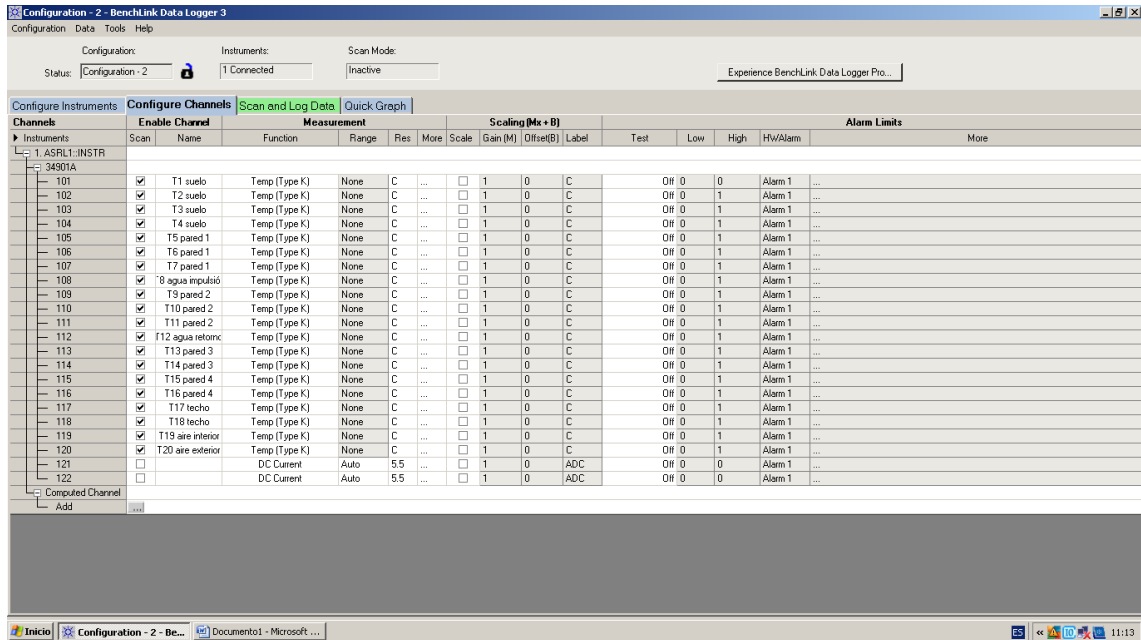


Ilustración 12: Configuración de los canales como termopares tipo k.

En “Scan and Log Data”, referente a la adquisición y memorización, seleccionamos que la adquisición de temperaturas ocurra cada 5 minutos (Ilustración 13), ya que el sistema va a estar en funcionamiento por muchas horas (aproximadamente periodos de 1 día) y además tiene una gran inercia térmica, por tanto la evolución de las temperaturas es lenta y con este periodo es suficiente para visualizarla.

# ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

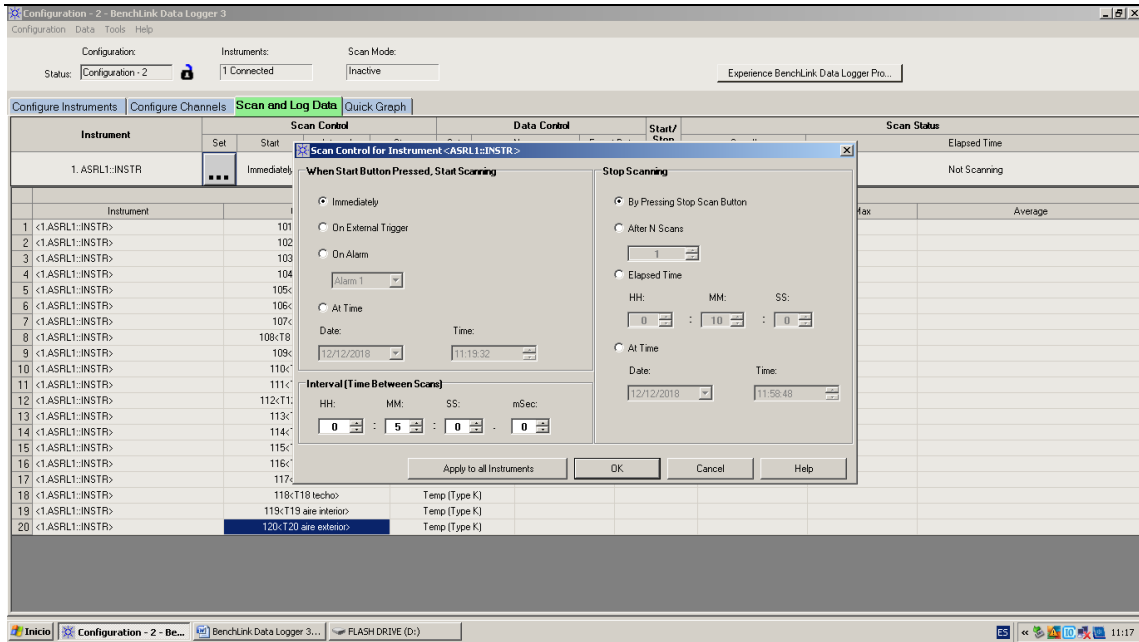


Ilustración 13: Definición de intervalo entre mediciones.

## 6.5 Montaje del caudalímetro

El último elemento a instalar para terminar con el montaje del sistema de adquisición de datos es el caudalímetro. El caudalímetro que empleamos para la medida del caudal de agua circulante por el circuito secundario de la instalación es el Siemens SITRANS F M MAG 5100W (Ilustración 14).



Ilustración 14: Caudalímetro SITRANS F M MAG 5100W

## ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

Para su ubicación, buscamos el lugar idóneo en el que situar el caudalímetro para su correcto funcionamiento. Para ello, lo debemos ubicar en la parte trasera de la cámara, donde se encuentra la impulsión y el retorno del agua al suelo radiante. En concreto, instalamos el caudalímetro en la impulsión.

La instalación del caudalímetro precisa de unas distancias a su entrada y salida de al menos 50 cm de tubería recta, porque debemos evitar que el flujo que atraviesa a este sea turbulento, lo que influiría en la medida que se está realizando. Así que situamos el caudalímetro respetando estas distancias y sobre un taburete que lo eleve del suelo para mayor comodidad y conseguir una conexión más recta entre la salida de la bomba y la entrada de la tubería a la cámara.

Preparamos también dos bridas, como vemos en la Ilustración 15, que nos aseguren la estanqueidad necesaria en las conexiones de entrada y salida del caudalímetro y evitar pérdidas de agua y/o infiltraciones de aire, conectadas a unos pequeños tramos de manguera que conectaremos a la instalación, a la que abrimos una parte para poder disponer el caudalímetro.



Ilustración 15: Bridas para la conexión del caudalímetro.



## **6.6 Modificaciones posteriores**

### **6.6.1 Conexión del caudalímetro**

Tras las primeras medidas, queremos también registrar el caudal en una de las entradas restantes de la tarjeta de adquisición de datos, que corresponden a entradas de corriente. Así, como el caudalímetro da la posibilidad de extraer una señal de corriente del mismo procedemos a configurarlo.

Con esto, lo que queremos conseguir es un mejor ajuste de la potencia dada por el suelo radiante al adquirir los datos, ya que se toma un valor de caudal a la vez que se toman todas las temperaturas que se están registrando del interior y exterior de la cámara, cada 5 minutos y durante aproximadamente 1 día, que es el tiempo que toman las experiencias realizadas, en vez de establecer un valor de caudal medio fijo en los cálculos, según se observaba en la pantalla del caudalímetro.

Para configurarlo, en primer lugar, conectamos el caudalímetro a la tarjeta de adquisición de datos a una de las entradas de corriente con dos cables eléctricos (positivo y negativo), respetando la polaridad de entrada a la misma, que se comprueba previamente con un multímetro. Una vez hecho esto, desde el programa añadimos el canal correspondiente al caudalímetro, el cual se indica como señal de corriente. Realizamos una medida y, por el orden de magnitud, sabemos que estamos midiendo en amperios, por lo que lo tenemos en cuenta para determinar la recta que vamos a implementar en este canal, la cual permite que el mismo programa devuelva el valor del caudal directamente, según la intensidad de corriente registrada.

Por otra parte, del manual del dispositivo conseguimos la información del rango de intensidad de la corriente que se obtiene de la señal del caudalímetro, el cual es de 4 mA a 20 mA. Este mínimo no se encuentra en 0 mA, como en muchos otros aparatos electrónicos como por ejemplo las alarmas, ya que en la realidad el 0 no se consigue por haber siempre remanencias de corriente, por pequeñas que sean, lo que podría dar paso a errores.

Desde el mismo caudalímetro, también, navegamos por el menú para establecer el rango de caudal más apropiado para las mediciones que va a realizar. Como sabemos por las experiencias anteriores que el valor promedio de caudal se mantenía en unos 160-180 l/h, elegimos la escala de 0 a 500 l/h, por ser la que mejor se ajusta.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

Con todo esto, ya podemos determinar la recta que calcule el valor de caudal que se mide, y será del tipo:

$$y = m \cdot x + n \quad (9)$$

Donde:

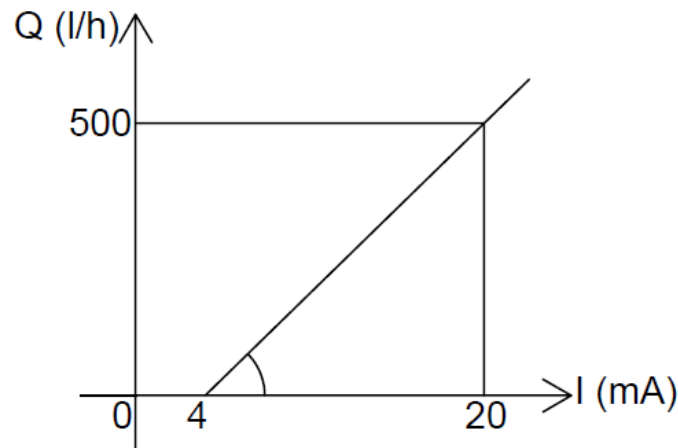
y: valor del caudal Q en l/h

m: pendiente de la recta

x: valor de la intensidad en mA

n: origen de la recta

De esta forma, la recta tendrá la forma siguiente:



Así pues, calculamos el valor de la pendiente según la expresión:

$$m = \frac{Q [l/h]}{I [A]} = \frac{500}{(20 - 4) \cdot 10^{-3}} = 31250 \left[ \frac{l}{h \cdot A} \right] \quad (10)$$

En la que ya se indica la corriente en amperios, para introducir el valor obtenido de la pendiente directamente al programa.

Por último, la ordenada  $n$  la obtenemos multiplicando el valor de la pendiente por el valor de corriente entre el 0 y el valor mínimo (4 mA):

$$n = m \cdot I = 31250 \left[ \frac{l}{h \cdot A} \right] \cdot 4 \cdot 10^{-3} [A] = 125 [l/h] \quad (11)$$

**ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS**

Este valor queda en la zona de caudal negativo, es decir, la recta empieza en -125 l/h. Por tanto, la recta queda de la siguiente forma, utilizando (9):

$$y = 31250 \cdot x - 125$$

O lo que es lo mismo:

$$Q [l/h] = 31250 \cdot I - 125 \quad (12)$$

Y estos, son los valores que caracterizan la recta e incluimos en el programa (Ilustración 16).

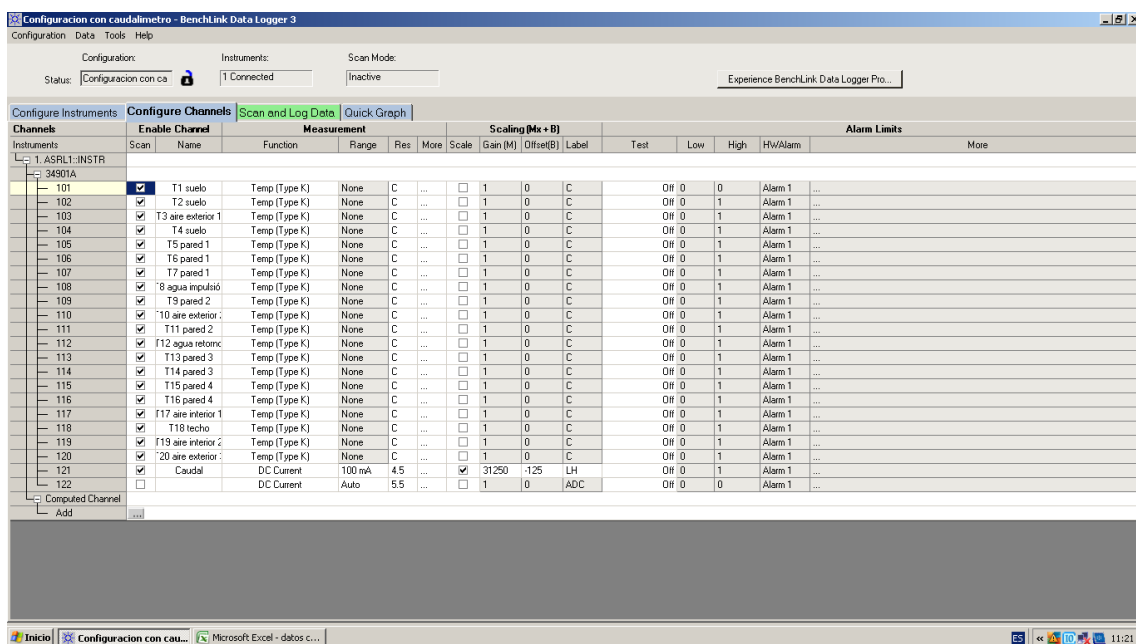


Ilustración 16: Configuración del caudalímetro en el programa.

# ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

Last Scan Results							
Instrument	Channel	Measurement	Data	Alarm	Min	Max	Average
1 <1.ASRL1:INSTR>	101<T1 suelo>	Temp (Type K)	17.93700 C	Off	17.93700 C	17.94200 C	17.93950 C
2 <1.ASRL1:INSTR>	102<T2 suelo>	Temp (Type K)	17.69700 C	Off	17.69700 C	17.70700 C	17.70200 C
3 <1.ASRL1:INSTR>	103<T3 suelo>	Temp (Type K)	17.39000 C	Off	17.39000 C	17.43000 C	17.41000 C
4 <1.ASRL1:INSTR>	104<T4 suelo>	Temp (Type K)	17.56000 C	Off	17.56000 C	17.58700 C	17.57350 C
5 <1.ASRL1:INSTR>	105<T5 pared 1>	Temp (Type K)	17.02400 C	Off	17.02400 C	17.05300 C	17.03850 C
6 <1.ASRL1:INSTR>	106<T6 pared 1>	Temp (Type K)	17.22300 C	Off	17.22300 C	17.23300 C	17.22800 C
7 <1.ASRL1:INSTR>	107<T7 pared 1>	Temp (Type K)	17.08900 C	Off	17.08900 C	17.11500 C	17.10200 C
8 <1.ASRL1:INSTR>	108<T8 agua impulsión>	Temp (Type K)	33.06500 C	Off	16.71800 C	33.06500 C	24.89150 C
9 <1.ASRL1:INSTR>	109<T9 pared 2>	Temp (Type K)	16.96600 C	Off	16.96600 C	17.00900 C	16.98750 C
10 <1.ASRL1:INSTR>	110<T10 pared 2>	Temp (Type K)	18.49800 C	Off	17.42600 C	18.49800 C	17.96200 C
11 <1.ASRL1:INSTR>	111<T11 pared 2>	Temp (Type K)	16.96300 C	Off	16.96300 C	16.98100 C	16.97200 C
12 <1.ASRL1:INSTR>	112<T12 agua retorno>	Temp (Type K)	17.60900 C	Off	16.01400 C	17.60900 C	16.81150 C
13 <1.ASRL1:INSTR>	113<T13 pared 3>	Temp (Type K)	16.67600 C	Off	16.67600 C	16.69200 C	16.68400 C
14 <1.ASRL1:INSTR>	114<T14 pared 3>	Temp (Type K)	16.70200 C	Off	16.70200 C	16.71500 C	16.70850 C
15 <1.ASRL1:INSTR>	115<T15 pared 4>	Temp (Type K)	16.75700 C	Off	16.75700 C	16.77000 C	16.76350 C
16 <1.ASRL1:INSTR>	116<T16 pared 4>	Temp (Type K)	16.72700 C	Off	16.72700 C	16.76400 C	16.74950 C
17 <1.ASRL1:INSTR>	117<T17 techo>	Temp (Type K)	16.75600 C	Off	16.75600 C	16.76900 C	16.76250 C
18 <1.ASRL1:INSTR>	118<T18 techo>	Temp (Type K)	16.75100 C	Off	16.73100 C	16.75100 C	16.74100 C
19 <1.ASRL1:INSTR>	119<T19 aire exterior>	Temp (Type K)	16.72400 C	Off	16.72400 C	16.75800 C	16.74100 C
20 <1.ASRL1:INSTR>	120<T20 aire exterior>	Temp (Type K)	17.58100 C	Off	17.56400 C	17.58100 C	17.57250 C
21 <1.ASRL1:INSTR>	121<Caudalab>	DC Current	174.2812 LH	Off	167.2812 LH	174.2812 LH	170.7812 LH

Ilustración 17: Registro de datos incluyendo el caudalímetro

En el que, como observamos, se obtiene un valor de 167'28 l/h en la primera medida (Ilustración 17), coincidente con el valor leído directamente de la pantalla del caudalímetro en este instante, por lo que concluimos que la conversión de corriente a caudal realizada es adecuada.

## 6.6.2 Termopares modificados

Para conseguir una lectura de la temperatura exterior más precisa, decidimos mover uno de los termopares del techo al aire interior. Esta distribución es la que aparece en planos, por ser la última adoptada y definitiva, con dos termopares en el techo. [Plano nº 2].

También probamos en una ocasión moviendo un termopar del suelo al aire exterior, para tener al menos dos lecturas de este, y tras haber comprobado que la temperatura en el suelo es prácticamente uniforme.

Al mismo tiempo, fijamos mejor todos los termopares que miden temperaturas de las superficies interiores de la cámara, para dejarlos bien pegados y asegurar que la temperatura que miden es la de la superficie en que están instalados, y no la del aire.

## **7. Obtención y tratado de datos**

### **7.1 Puesta a punto del sistema**

Llegado el momento de realizar experiencias con el sistema de suelo radiante y monitorizar su comportamiento, necesitamos una serie de medidas y pasos para conseguir una correcta lectura de los datos necesarios.

En primer lugar, comprobamos que los termopares pegados a las superficies del interior de la cámara siguen en su posición, especialmente para verificar que los correspondientes a los distintos puntos de lectura del techo no hayan caído, o que los del suelo no se hayan levantado, pasando de leer la temperatura de las baldosas a la del aire.

Con esta comprobación hecha, debemos apagar las luces interiores de la cámara para que no aporten potencia y dejamos la misma con la puerta debidamente cerrada.

Por otra parte, comprobamos los termopares correspondientes a las lecturas de temperatura del agua a la entrada y salida al suelo radiante.

### **7.2 Caldera y circuito de agua**

En las experiencias que realizamos para el presente trabajo la temperatura del suelo radiante es baja, como corresponde con un suelo radiante en la realidad, por ser sistemas que funcionan a baja temperatura, a diferencia, por ejemplo, de los radiadores tradicionales, que trabajan a temperaturas elevadas. La caldera es la encargada de conseguir la temperatura que permite funcionar al suelo radiante, junto con los circuitos primario y secundario y el depósito intercambiador, encargados de transportar el calor de la caldera al suelo radiante.

Con esta finalidad, programamos la caldera a 38°C, que es el mínimo que puede proporcionar. El circuito primario se mantendrá a esta temperatura aproximadamente, gracias al termostato regulador de la misma caldera. Si en algún momento la temperatura aumenta, la llama se apaga, hasta conseguir otra vez a la temperatura indicada.

Para conseguir esta temperatura, la caldera trabaja aporta la mínima potencia, que son 10,7 kW. Como utiliza gas natural, que asemejamos al metano, el manual de la caldera indica que consume 12,5 kW de este gas (Ilustración 18).

***CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS***

		ISOFAST C 28 E	ISOFAST F 28 E	ISOFAST C 35 E	ISOFAST F 35 E
Potencia útil en calefacción,	ajustable de... (kW)	10,1	10,7	11,6	12
	a.. (kW)	27,6	27,6	34,6	34,6
Consumo calorífico mínimo	(kW)	12	12,5	14	14
Consumo calorífico máximo	(kW)	30,7	30,3	38,4	37,6
Rendimiento sobre el P.C.I.	(%)	90	91	90	92
Temperatura máx. en la ida	(°C)	87	87	87	87
Regulación	regulable por el usuario entre 38 y 87°C				

Ilustración 18: Consumo de la caldera. Recuperado de [6]

Tras fluir el calor por el circuito primario, el depósito y de ahí pasar el calor al circuito secundario, la temperatura del agua en el circuito secundario baja respecto a la del primario, debido a las pérdidas en el sistema. Este fenómeno lo apreciamos más tarde al leer la temperatura de impulsión del suelo radiante, correspondiente a la de salida del depósito por el circuito secundario.

Para las primeras experiencias realizadas, ponemos en funcionamiento la caldera y al mismo tiempo hacemos circular el agua por el suelo radiante. Es decir, la caldera calienta el agua del circuito primario, que pasa por el depósito, en el que intercambia calor con el circuito secundario, y este se lo traslada a la cámara mediante la radiación del suelo.

Con esto, se producen dos regímenes transitorios al mismo tiempo. En primer lugar, el del depósito: entre circuito primario y secundario; y en segundo lugar en la cámara. De este modo, el régimen transitorio total resulta muy extenso en el tiempo, como comprobamos en el análisis de los resultados posterior.

Queremos evitar este fenómeno, ya que cuando programamos estos regímenes en los modelos informáticos resulta en una problemática añadida e innecesaria, porque lo que pretendemos es analizar el comportamiento de la cámara únicamente.

Para corregir esto, procedemos de manera distinta en otras experiencias. Lo que hacemos ahora es aislar en el depósito al circuito primario, cerrando las válvulas correspondientes

a la entrada y salida del depósito del circuito secundario, y ponemos en funcionamiento la caldera para que se consiga la temperatura de en torno a 30°C en el circuito primario, hasta llegar a un régimen permanente.

Una vez finalizado este transitorio, abrimos las válvulas y ponemos en funcionamiento la bomba del circuito secundario, iniciando en este momento la toma de datos.

De este modo, el transitorio que se produce es únicamente el del suelo radiante para calefactar la cámara, que es el mismo producido en los modelos informáticos diseñados, al programar sólo el régimen transitorio del suelo radiante.

### **7.3 Obtención de datos**

Al iniciar la lectura de los datos mediante la tarjeta de adquisición de datos, nos resulta importante comprobar que cada temperatura obtenida es razonable. Es decir, las temperaturas interiores de la cámara deben ser iguales aproximadamente antes de abrir las válvulas y poner en circulación agua caliente por el sistema, y ser iguales a su vez a la temperatura exterior de la cámara si ésta ha estado abierta previamente.

Cada lectura de datos se produce con una diferencia de 5 minutos entre ellas, así que, iniciada una experiencia, es conveniente que permanezcamos un tiempo para seguir visualmente la evolución del sistema, dejándolo luego funcionar hasta aproximadamente 1 día. En concreto, cuando iniciamos cada experiencia permanecemos alrededor de 1 hora en observación de los datos registrados y del correcto funcionamiento de todos los componentes del sistema.

Una vez transcurrido el tiempo pertinente para una experiencia, recogemos los datos que han estado recopilándose. Este es un momento delicado, ya que un fallo informático o humano puede producir la pérdida de muchos datos, tiempo (1 día) y dinero (gas, electricidad).

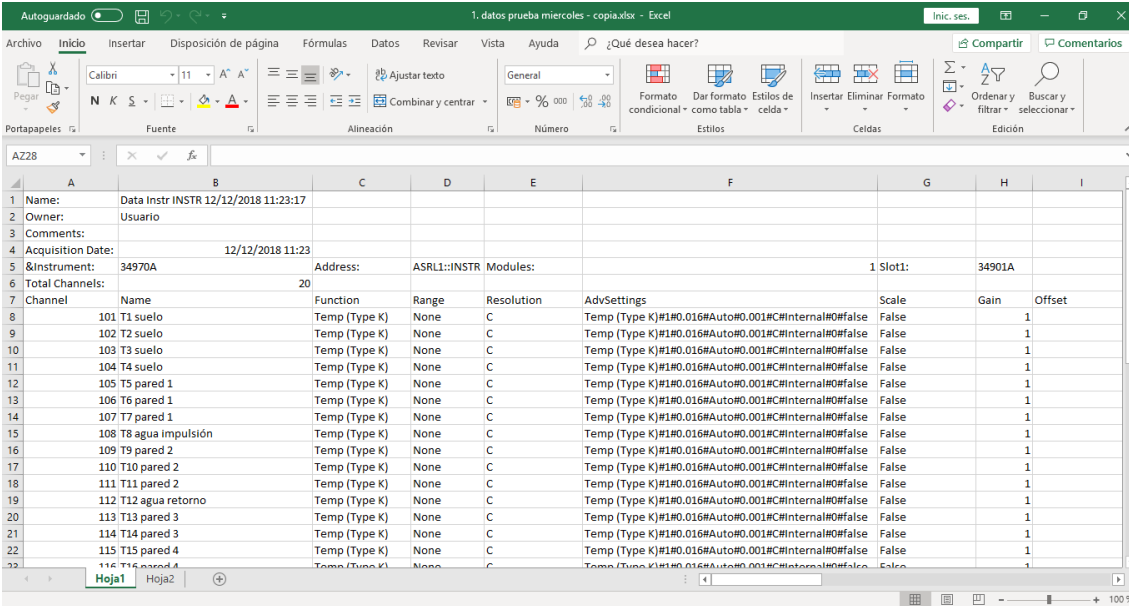
Para el guardado de los datos simplemente se elige realizar una importación de texto en formato .csv, que podemos tratar con Excel para el análisis de estos datos.

Tras esto, abrimos un nuevo documento de Excel. Desde aquí, en el apartado de Datos indicamos la obtención de datos desde un archivo de texto .csv. Abrimos el documento

## ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

correspondiente a la experiencia que vamos a analizar y seleccionamos como separador decimal el punto (.) y nada para separar los miles. Para que los datos se distribuyan en las distintas celdas, elegimos el separador coma.

En este punto, si todo ha ido bien, ya nos aparece la información correspondiente al actual documento, como pueden ser la fecha de la experiencia o el nombre del equipo (tarjeta de adquisición), junto con una serie de columnas tituladas según el nombre que se le ha dado al canal (el dato que está recopilando) desde el programa que controla la tarjeta de adquisición de datos, con los valores que se han obtenido para cada canal en el tiempo que ha estado recopilando.



Channel	Name	Function	Range	Resolution	AdvSettings	Scale	Gain	Offset
1	Name:	Data Instr INSTR 12/12/2018 11:23:17						
2	Owner:	Usuario						
3	Comments:							
4	Acquisition Date:	12/12/2018 11:23						
5	&Instrument:	34970A	Address:	ASRL1::INSTR	Modules:	1 Slot1:	34901A	
6	Total Channels:	20						
Channel	Name	Function	Range	Resolution	AdvSettings	Scale	Gain	Offset
8	101 T1 suelo	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
9	102 T2 suelo	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
10	103 T3 suelo	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
11	104 T4 suelo	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
12	105 T5 pared 1	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
13	106 T6 pared 1	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
14	107 T7 pared 1	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
15	108 T8 agua impulsión	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
16	109 T9 pared 2	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
17	110 T10 pared 2	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
18	111 T11 pared 2	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
19	112 T12 agua retorno	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
20	113 T13 pared 3	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
21	114 T14 pared 3	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
22	115 T15 pared 4	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1
23	116 T16 pared 4	Temp (Type K)	None	C	Temp (Type K)#1#0.016#Auto#0.001#C#Internal#0#false	False	1	1

Ilustración 19: Recuperación de los datos de las experiencias en Excel.

Tras esto, la hoja Excel queda preparada para trabajar en ella (Ilustración 19).

### 7.4 Tratado de los datos obtenidos

Para el estudio de las distintas experiencias, la cantidad de datos nos resulta muy extensa, puesto que hay 22 señales registradas en la tarjeta de adquisición de datos, y como la duración de estas experiencias es de al menos un día con registro de datos cada 5 minutos, obtenemos 288 filas de datos al día. Esto nos conduce a decidirnos por un estudio gráfico, en el que vamos a representar las temperaturas registradas y la potencia aportada por el suelo radiante en función del tiempo.



ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

En primer lugar, añadimos una columna de tiempo tras las de cada canal. Para ello, indicamos un 0 en la primera fila y un 5 en la segunda (en minutos) y arrastramos hasta el último momento de registro de datos para que queden referenciados a un tiempo (cada momento en que se registran datos, cada 5 minutos).

Ahora construimos la siguiente columna con el tiempo, pero esta vez en horas (minutos/60) para que a la hora de graficar quede con unas unidades más ajustadas, ya que las experiencias duran en torno a 1 día, que en minutos quedaría una cifra muy elevada.

En celdas adicionales, por encima de las columnas que contienen los datos registrados, introducimos el calor específico del agua, para el cálculo de la potencia. Tomamos  $C_{p_{agua}} = 4180 \text{ J/KgK}$ . Además, para las primeras experiencias, en las que no registramos los datos del caudalímetro con la tarjeta de adquisición de datos, sino tomando un valor según la observación realizada durante la primera hora de la experiencia, introducimos un valor medio de caudal que se está controlando visualmente, resultando unos 174 l/h.

Por otra parte, en las experiencias en las que disponemos del caudalímetro monitorizado, obtenemos una columna al importar el archivo de texto con los valores correspondientes a lecturas de caudal cada 5 minutos, como el resto de las lecturas de temperatura.

Procedemos a crear una columna que calcule la potencia proporcionada por el suelo radiante a cada momento. Su ecuación será:

$$Q = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_{p_{agua}} \cdot (T_{ai} - T_{ar}) \quad (13)$$

En la que:

Q: Potencia aportada por el suelo radiante (W)

$\rho$ : Densidad del agua en ( $\text{kg/m}^3$ )

$\dot{V}$ : Caudal de agua ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$C_{p_{agua}} = 4180 \text{ (J/(KgK))}$

$T_{ai}$ : Temperatura del agua en la impulsión ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{ar}$ : Temperatura del agua en el retorno ( $^{\circ}\text{C}$ )

Seguidamente, construimos columnas correspondientes a la media de temperaturas del suelo, del techo, de los dos niveles de lectura de temperatura en paredes (inferior y superior), del aire interior y del aire exterior, con la función PROMEDIO de Excel.

Una vez disponemos de todos los datos necesarios, procedemos a graficar, por una parte, la potencia, y por otra las distintas temperaturas.

Para la potencia, las series son el tiempo (eje X) y la columna con las potencias calculadas con la ecuación (eje Y). Elegimos estas y obtenemos el gráfico, al que añadimos títulos a los ejes, siendo Tiempo [h] para el eje X y Q [W] para el eje Y.

Este gráfico nos es interesante cuando estamos analizando experiencias iniciando el sistema desde la temperatura ambiente para calefactarlo con el suelo radiante; pero no tendrán interés cuando estemos analizando paros del sistema (caldera apagada y circuito secundario sin circulación de agua), sin aporte de potencia, después de una experiencia con el suelo radiante calefactando y pasar de una temperatura elevada de la cámara a un descenso, con su correspondiente transitorio.

Seguidamente, graficamos las temperaturas. Para esto, la serie del eje X sigue siendo el tiempo en horas, pero para el eje Y habrá tantas series como temperaturas registradas (medias de superficies y aire, agua de impulsión y agua de retorno), por lo que nos es de gran ayuda una leyenda con los nombres de cada temperatura, y graficamos cada una con un color distinto.

## 7.5 Gráficos de los resultados de las experiencias

- **Experiencia nº 1:** Arranque Miércoles 19/12/2018 (depósito a T<sup>a</sup> estable)

Esta experiencia se trata de un arranque del sistema de suelo radiante, en la que partimos de una T<sup>a</sup> del depósito ya estable a unos 34°C, y abrimos las válvulas y ponemos en funcionamiento la bomba que hace circular el agua por el circuito secundario. La duración de la experiencia es de aproximadamente 1 día (Ilustraciones 20 y 21).

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

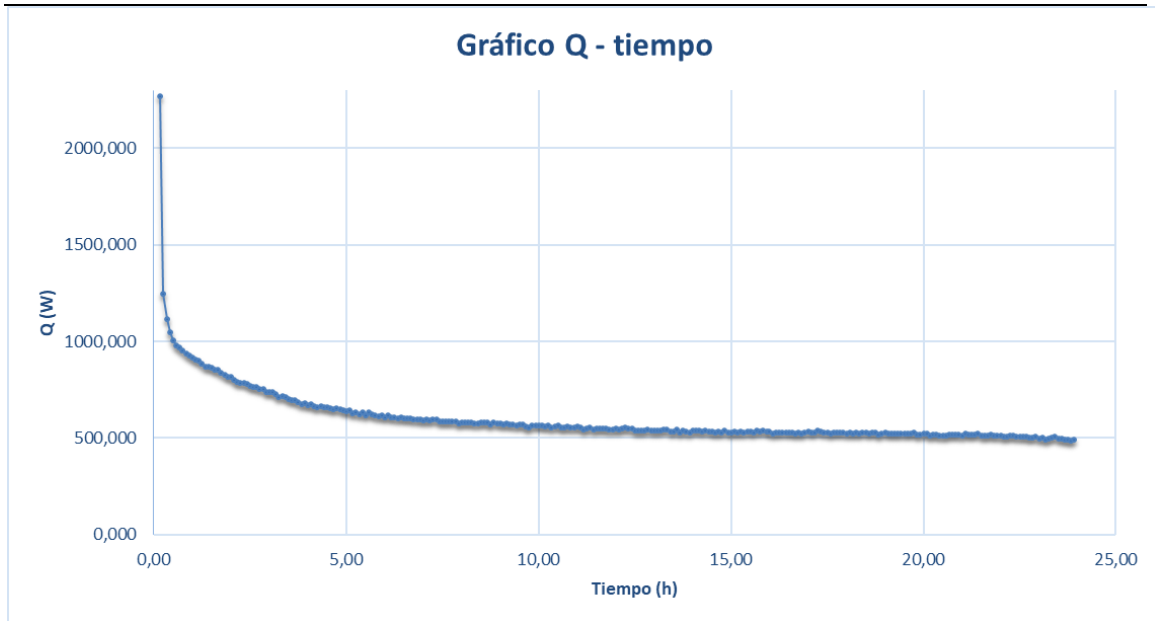


Ilustración 20: Potencia en la experiencia n° 1.

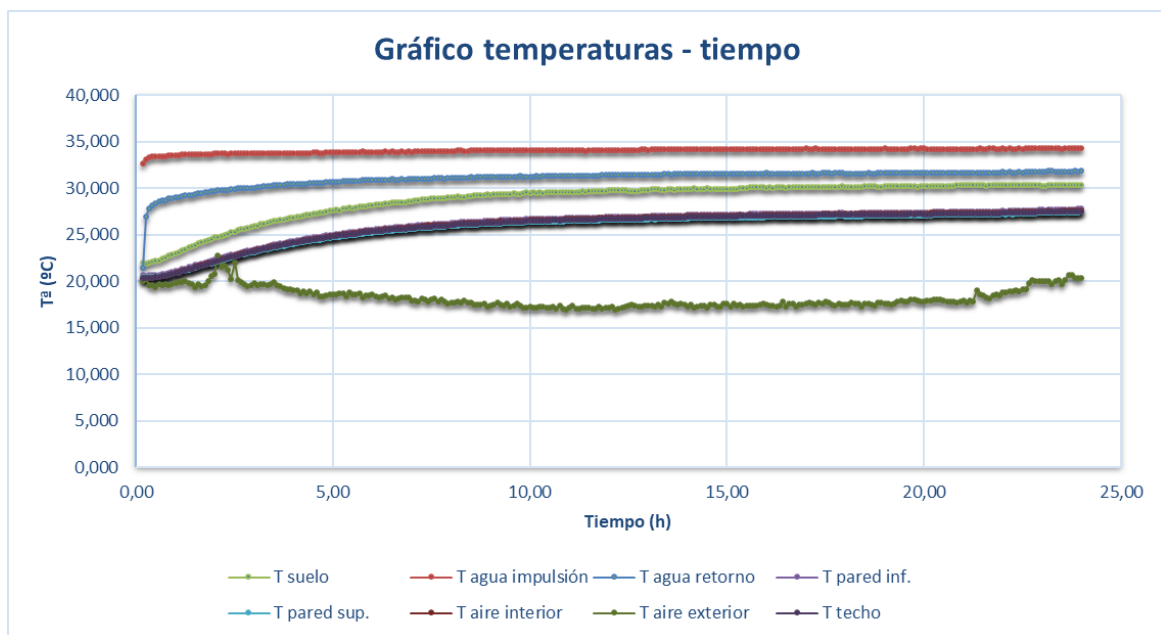


Ilustración 21: Temperaturas en la experiencia n° 1.

- **Experiencia n° 2:** Arranque Lunes 14/01/2019 (depósito a Tª estable).

Esta experiencia se trata de un arranque del sistema de suelo radiante, pero con una mayor duración, de aproximadamente 3 días (Ilustraciones 22 y 23).

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

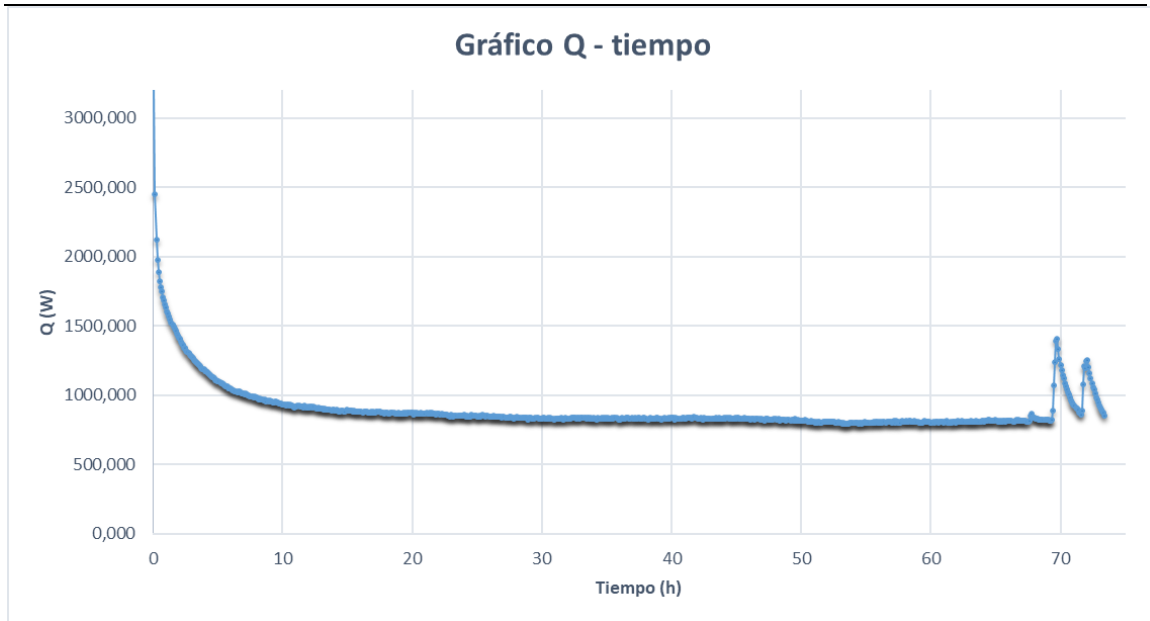


Ilustración 22: Potencia en la experiencia n° 2.

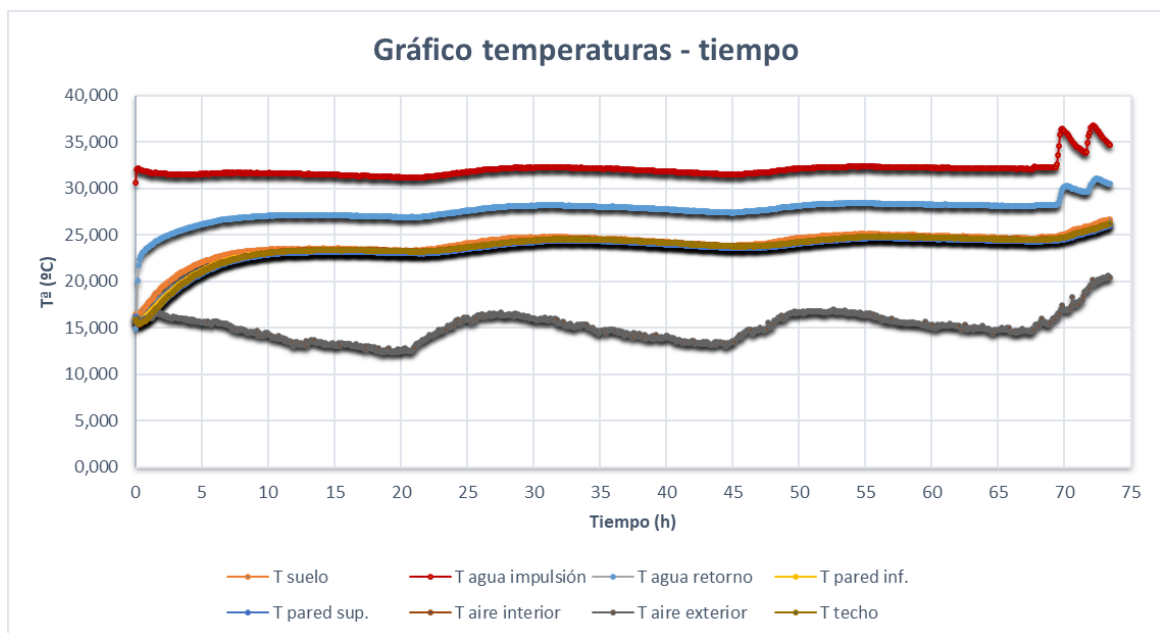


Ilustración 23: Temperaturas en la experiencia n° 2.

- **Experiencia n° 3:** Arranque Jueves 21/02/2019 (depósito a  $T^a$  estable y datos de caudalímetro registrados).

Esta experiencia se corresponde con un arranque del sistema en el que partimos de una  $T^a$  en el depósito estable, y en la que además incluimos el registro de caudales tomados por el caudalímetro en la tarjeta de adquisición de datos (Ilustraciones 24 y 25).

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

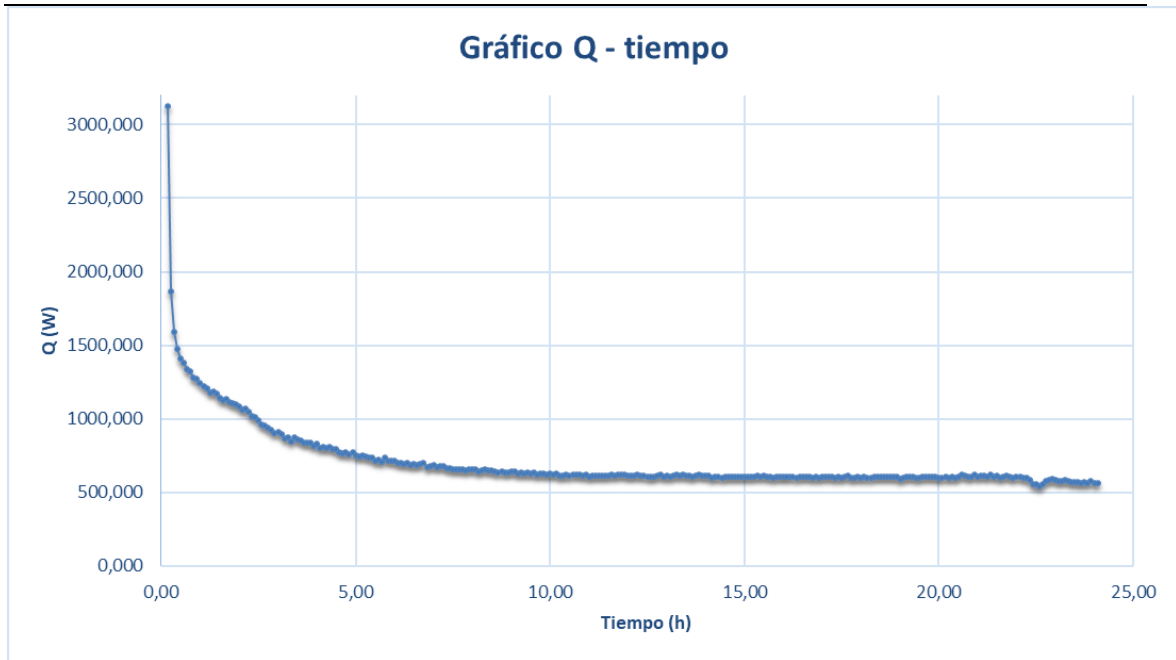


Ilustración 24: Potencia en la experiencia n° 3.

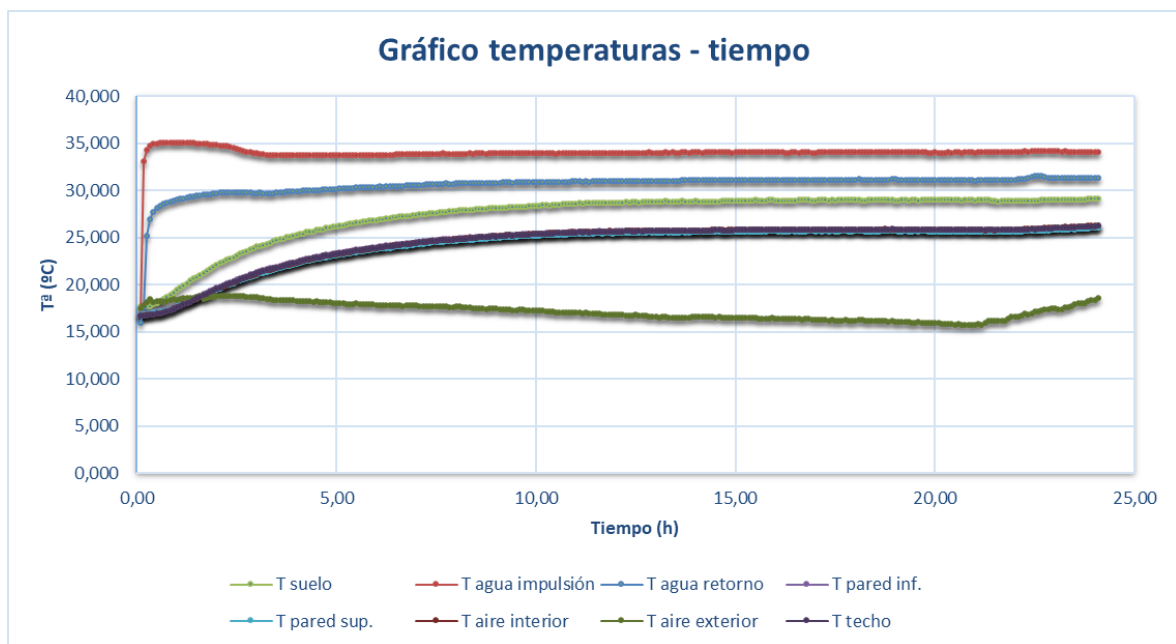


Ilustración 25: Temperaturas en la experiencia n° 3.

- **Experiencia n° 4:** Parada Viernes 22/02/2019.

Esta experiencia se corresponde a la parada del sistema tras el arranque registrado en la gráfica anterior. Las temperaturas del final de la experiencia del Jueves 21/02/2019 se corresponden con las del inicio de esta (Viernes 22/02/2019) por ser del mismo instante,

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

en el cual estamos cerrando las válvulas del circuito secundario al depósito y parando la bomba. No incluimos el gráfico de la potencia aportada, por ser nula (Ilustración 26).

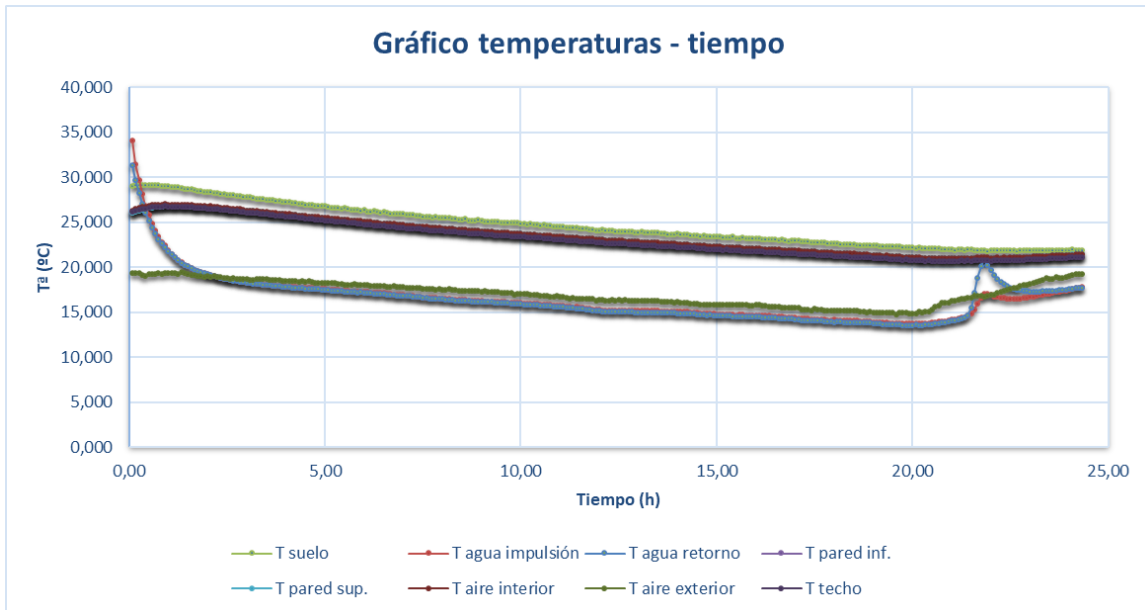


Ilustración 26: Temperaturas en la experiencia nº 4.

## **8. Resultados aplicados a la comprobación de modelos**

En este apartado explicamos el funcionamiento de los programas de simulación energética de edificios utilizados y cómo se implementa un suelo radiante, para poder realizar la comparación con la instalación del laboratorio.

### **8.1 DEVS**

Nos basamos en [5] para explicar el fundamento de esta metodología para realizar simulaciones energéticas por eventos discretos, que nos es de utilidad para la comprobación de la instalación que estamos analizando, de manera informática.

Con el software PowerDEVS como motor de simulación, se pueden realizar simulaciones DEVS, un método que consiste en una red de nodos que actúan como resistencia-capacidad. Esta red, que es el modelo de unas superficies en este caso, se compone de una serie de elementos denominados “Atomic”, los cuales evolucionan solamente cuando se registra un evento o cuando ha transcurrido el tiempo que se ha establecido previamente entre dos medidas, gracias a un control independiente que lleva cada uno de estos elementos.

Mientras que en otros programas de simulación energética de edificios el tiempo entre mediciones es fijo, utilizando una simulación de tipo DEVS el tiempo entre medidas para elementos, de distintas dinámicas (por ejemplo, la dinámica de un equipo de climatización frente a la de un cerramiento), se adapta para cada uno de esos elementos, por lo que es muy interesante y atractivo para utilizarlo en simulaciones energéticas de edificios.

El estudio mediante metodología DEVS se puede realizar en sistemas discretos, continuos o mixtos, con una evolución diferente para cada módulo. La simulación DEVS gestiona llamadas a cada módulo y sus entradas y salidas.

Para implementar el formalismo DEVS, el motor de simulación PowerDEVS tiene la capacidad de simular sistemas definidos en DEVS y que se desarrollan en programación escrita en lenguaje C++.

En cuanto a la programación, por una parte encontramos el editor del modelo para definir la relación entre los elementos atómicos que forman el formalismo DEVS, programando el código C++ con el editor de elementos atómicos, y mediante el preprocesador se traduce el modelo de forma gráfica a código C++ que se puede simular; y finalmente la

interfaz del simulador, para ejecutar y asignar parámetros a la simulación y poder visualizar los resultados obtenidos.

En DEVS, los modelos se expresan en función de los eventos de entrada y salida (Ilustración 27), con funciones de transición internas ( $\partial_{int}()$ ) y externas ( $\partial_{ext}()$ ); con los estados posibles del modelo; llamando una función cuando ha transcurrido el tiempo de transición interno ( $\lambda()$ ) y con otra función ( $ta()$ ) que deja establecido el tiempo que tiene que transcurrir antes que ocurra la transición posterior.

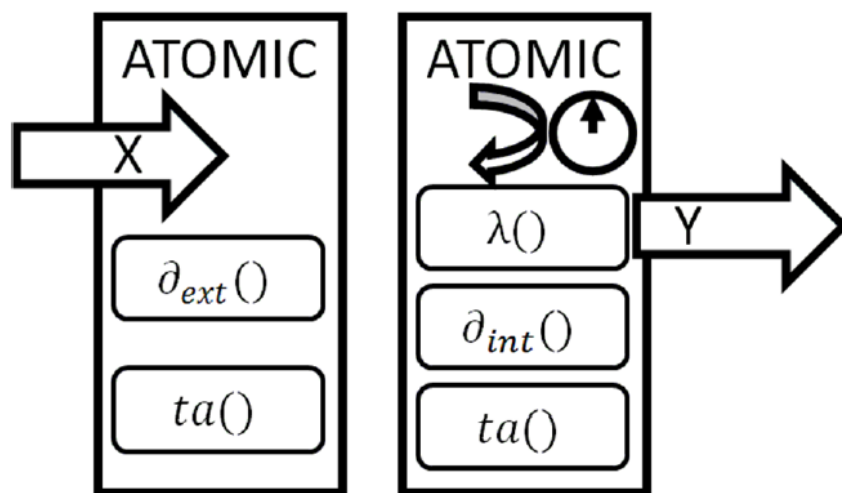


Ilustración 27: Esquema de funcionamiento de los elementos “Atomic”. Recuperado de [5]

Finalmente, para implementar cerramientos en el modelo, como comentábamos previamente, DEVS utiliza una red de nodos con una estructura de resistencias – capacidades (Ilustración 28), donde los nodos que forman la red se definen como elementos “Atomic” para este tipo de simulación. Estos nodos disponen de un control independiente y únicamente cuando registran un evento o cuando termina el tiempo establecido entre dos mediciones evoluciona, generando, en ese momento, un evento externo sobre aquellos nodos que tiene conectados. En cada nodo, la variable controlada es su temperatura.



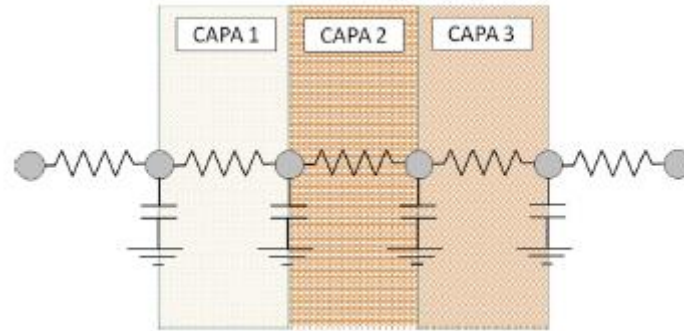


Ilustración 28: Esquema de una estructura de resistencias-capacidades. Recuperado de [5]

### 8.1.1 Cómo funciona en suelos radiantes

En el caso de los suelos radiantes, la tubería que discurre bajo el suelo, que es el propio sistema de suelo radiante, es un flujo de calor que entra en el nodo interior del suelo. Se le asignan las temperaturas de entrada y salida, y el caudal de agua circulante.

Adaptamos un esquema para la cámara que estamos analizando, como muestra la Ilustración 29, en la que el suelo radiante aporta el calor desde debajo de las capas que forman el suelo, para transmitirse por conducción a través de este, y posteriormente por radiación a cada una de las otras superficies interiores de la cámara (paredes y techo) y por convección al aire.

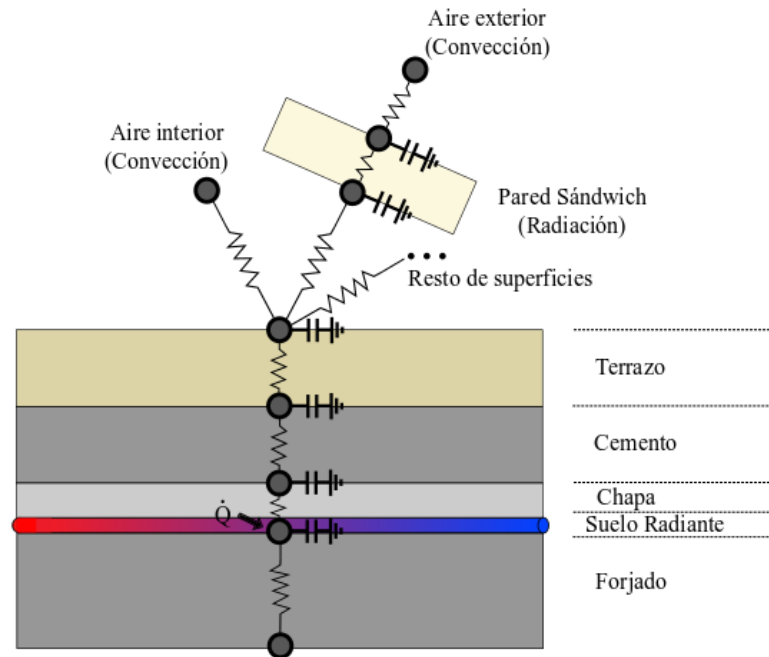


Ilustración 29: Esquema de la estructura de resistencias-capacidades para la cámara del laboratorio.

Indicamos la transmisión de calor por radiación a una de las paredes, y el “resto de superficies” engloba las otras tres paredes y el techo. También se representa el nodo que corresponde al aire interior, recibiendo el flujo de calor por convección, y el aire exterior que lo recibe desde los cerramientos de la cámara.

El forjado tiene un espesor mucho mayor al de la capa de cemento bajo el terrazo (el esquema no está a escala), por lo que aporta una resistencia mucho mayor, y el flujo de calor proporcionado por el suelo radiante ( $\dot{Q}$ ), que se añade directamente al nodo, se dirige principalmente hacia arriba, es decir, atravesando la capa de cemento de 3cm y el terrazo, para transmitirse por radiación y convección a la cámara.

### 8.1.2 Configuración del modelo en DEVS y resultados obtenidos

En primer lugar, debemos dejar claro que la realización de esta simulación no forma parte del trabajo, pero sí ha sido creada para este trabajo, sobre las condiciones de la cámara que estamos analizando.

## ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

---

Con la metodología explicada, se recrea la cámara objeto de ensayo del proyecto, definiendo para cada superficie las conexiones con el resto y con el ambiente, es decir, los medios por los que se producirá la transmisión de calor, por radiación y por convección. Una vez esto está listo, se realiza una simulación, de la que se obtienen temperaturas en los nodos que nos interesen.

Decidimos analizar la temperatura del suelo, la del aire en el interior de la cámara y la temperatura superficial de la cara interior de una de las paredes. Las condiciones bajo las que se ha realizado la simulación son las del día 14 de enero. Es decir, la temperatura ambiente del aire de la que parte, y la temperatura del agua que recorre el suelo radiante son datos de esa experiencia, lo que nos permite realizar una comparación con las temperaturas reales del suelo, aire y pared interior, con los datos obtenidos en la experiencia mencionada.

Esta experiencia es la más extensa de las que disponíamos, pues se puso en funcionamiento el sistema un viernes, para dejarlo actuar por todo un fin de semana, recogiendo los datos el lunes 14 de enero de 2019.

En una hoja Excel recuperamos la simulación obtenida, como hacíamos para las experiencias de medición de datos sobre la cámara del laboratorio. A continuación observamos la representación gráfica de los datos de la simulación frente a los del día de la experiencia de la que partimos para las condiciones. Representamos sólo el primero de los tres días, con el transitorio de arranque. Como comentábamos, tenemos una simulación de la temperatura del suelo, una del aire interior de la cámara y la de la pared. Con estas tres distintas temperaturas construimos tres gráficas con las temperaturas experimentales y de la simulación (Ilustraciones 30, 31 y 32).

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

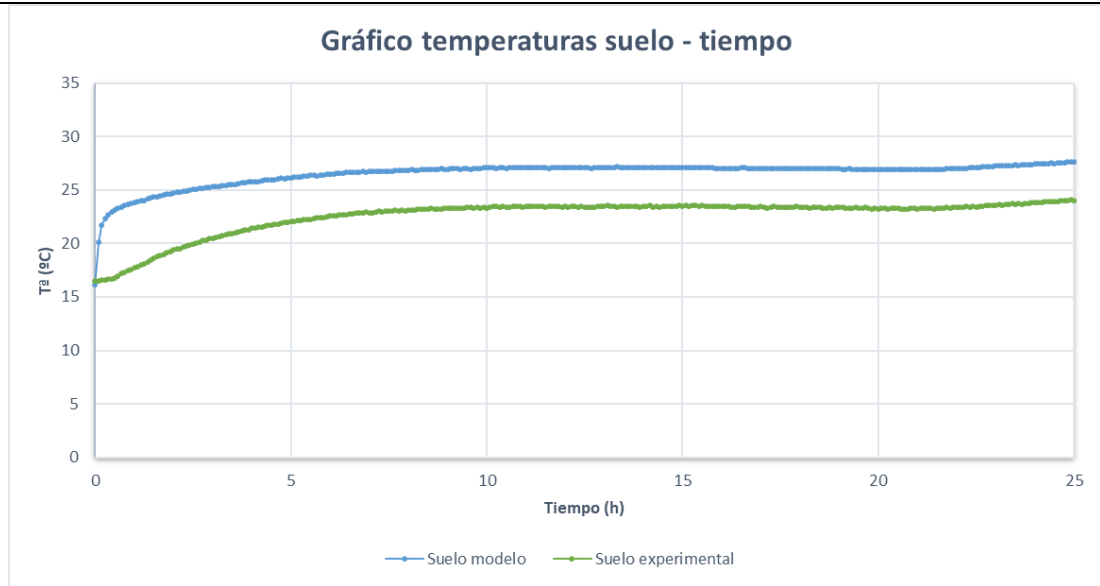


Ilustración 30: Gráfico con los resultados de la simulación de las temperaturas del suelo.

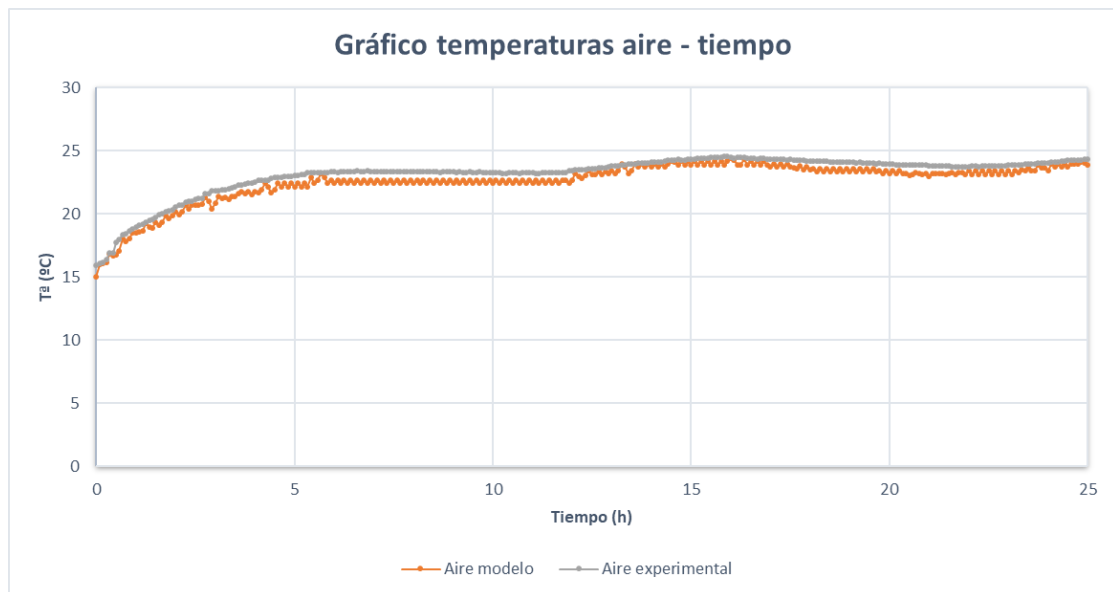


Ilustración 31: Gráfico con los resultados de la simulación de las temperaturas del aire.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MISMOS

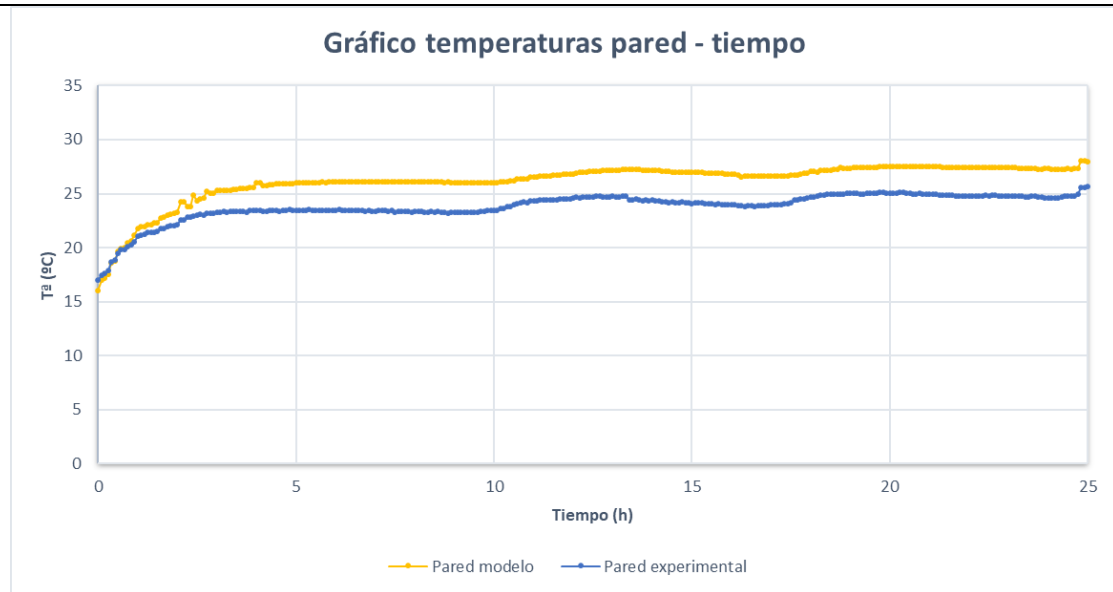


Ilustración 32: Gráfico con los resultados de la simulación de las temperaturas de la pared.

Como indica la leyenda, las temperaturas indicadas como “modelo” son las conseguidas en la simulación DEVS, mientras que las indicadas como “experimental” son las que obtenemos de la experiencia nº 2.

A primera vista, los resultados son prometedores, pues parece que el modelo se ajusta bastante bien a los resultados reales medidos por termopares. Pero podemos realizar una prueba estadística para determinar el ajuste del modelo generado por la simulación DEVS a los resultados medidos experimentalmente. Concretamente, decidimos aplicar el coeficiente R cuadrado, o coeficiente de determinación, directamente con la función R.CUADRADO de Excel. “El coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar”. [17]. Seleccionamos, por un lado, la columna con los valores experimentales y, por otro lado, la columna con los valores de la simulación.

En primer lugar, el resultado obtenido para el R cuadrado en la temperatura del suelo es de 0,892, o lo que podríamos expresar como un ajuste del modelo del 89,2 % a la temperatura real.

Para la temperatura del aire interior de la cámara, el ajuste es de 0,977, o del 97,7 %.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

Finalmente, para la temperatura superficial de la pared, el coeficiente de determinación es de 0,951, o del 95,1 %.

Otra prueba o operación que podemos realizar es la diferencia entre la temperatura del modelo y la real, para luego calcular el promedio de todas las diferencias, el valor medio.

En este caso, el valor medio de la diferencia de temperaturas (en valor absoluto con la función ABS) calculado con la función PROMEDIO para el suelo es de 3,68 °C.

Para el aire interior de la cámara, el resultado es de 0,53 °C.

Finalmente, para la superficie interior de la pared, el resultado obtenido en esta prueba es de 2,35 °C.

Consideramos estos resultados fiables, y abordaremos su análisis en las conclusiones.

## **9. Conclusiones y trabajos futuros**

Para concluir el proyecto, sintetizaremos los objetivos conseguidos en este análisis final, y planteando mejoras o ampliaciones del mismo para el futuro.

Con la realización de este proyecto se ha diseñado un sistema de adquisición de datos para el análisis del comportamiento transitorio de una instalación de suelo radiante. Con la tarjeta de adquisición de datos que hemos utilizado, para la adquisición y guardado de los datos de temperaturas y caudal de agua de las experiencias realizadas, para su posterior tratado.

Al analizar los datos obtenidos, representados gráficamente, hemos comprobado como efectivamente se produce un largo periodo transitorio en los arranques y paradas del sistema de suelo radiante, de algunas horas, debido a su elevada inercia térmica.

Posteriormente, al realizar la comparación de los datos del modelo proporcionado por una simulación energética con los obtenidos experimentalmente, comprobamos que existe un elevado grado de ajuste de la simulación a la realidad, con los valores del coeficiente R cuadrado para la temperatura del suelo (0,892), del aire interior de la cámara (0,977), y de la superficie interior de la pared (0,951), lo que calificamos de fiable.

La diferencia de temperaturas entre modelo y datos experimentales ha sido de entre 0,5 °C y unos 3,6 °C, podemos decir con seguridad que el modelo DEVS creado se ajusta bastante bien a la realidad, y aunque es mejorable, se podría emplear esta metodología para el estudio energético de edificios, cuando se requiera para realizar un nuevo proyecto, de la envergadura que sea, para ajustar el presupuesto a ofrecer a un cliente.

Queda para futuras ampliaciones de este trabajo, el desarrollo de un modelo utilizando el motor de simulación EnergyPlus, por ser el programa de simulación energética de edificios más extendido, tratando de recrear con la mayor exactitud posible las condiciones de la cámara y el sistema de suelo radiante, para poder comparar los resultados obtenidos con mediciones experimentales sobre la cámara, e incluso compararlo con el resultado DEVS.

Una posible rama de trabajo sería la de incluir muebles, iluminación, equipos informáticos o producción de frío al interior de la cámara, con la finalidad de aportar distinta carga térmica, así como simular en meses calurosos.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---



**Documento nº 2:**

# **PRESUPUESTO**

## 10. Presupuesto

En este apartado analizamos la inversión que es necesaria para llevar a cabo el proyecto, teniendo en cuenta los recursos materiales y personales, y los equipos utilizados. Este estudio económico se ha ajustado a la realidad en la mayor precisión posible. Cada precio y cada cantidad de los recursos utilizados está especificada y descrita al detalle.

### 10.1 Cuadros de precios unitarios

En primer lugar, vamos a especificar los cuadros de precios para los distintos conceptos a considerar en este presupuesto, en las siguientes tablas. En estas no se cuenta el IVA, porque se aplicará a los costes obtenidos posteriormente.

Código	Unidades	Descripción	Coste (€/año)	Horas	Coste (€/h)
MO01	h	Ingeniero (alumno)	39424,00	1792	22,00
MO02	h	Técnico de laboratorio	27646,55	1792	15,43

Tabla 1: Precios de recursos personales.

Esta tabla de recursos personales la configuramos teniendo en cuenta el salario bruto anual y las horas que se trabajan en el mismo año.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€/ud)
MA01	ud	Cable termopar tipo k 100m	34,63
MA02	ud	Cinta adhesiva	6,51
MA03	ud	RS PRO Silicone Grease 100 g Tube 494-124	7,61
MA04	ud	Carrete de estaño	10,00
MA05	ud	Material de oficina	5,00
MA06	ud	Cable eléctrico de 1 mm <sup>2</sup>	10,99

Tabla 2: Precios de materiales.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

<b>Código</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio (€/kWh)</b>
ELEC	kWh	Electricidad	0,05
GASN	kWh	Gas natural	0,11483

Tabla 3: Precios de energías.

<b>Código</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio (€/ud)</b>
EQ01	ud	Ordenador del laboratorio	500
EQ02	ud	Ordenador del alumno	500
EQ03	ud	Ordenador del profesor	600
EQ04	ud	Tarjeta de adquisición de datos Agilent 34970A	1650

Tabla 4: Precios de equipos.

## 10.2 Costes por secciones

Basándonos en los precios de los distintos recursos utilizados para llevar a cabo el proyecto, construimos unas tablas que calculan el coste de estos recursos en función de la cantidad utilizada de los mismos, a las que llamaremos secciones, agrupadas en este caso por su naturaleza.

En primer lugar, para la sección dedicada a los costes de mano de obra tenemos en cuenta el tiempo invertido por el alumno y el técnico de laboratorio. El alumno ha dedicado un total de 300 horas en el proyecto, englobando aprendizaje sobre la materia (calefacción por suelo radiante), diseño y montaje del sistema de recopilación de datos y redacción y conformación de los apartados del trabajo. Pero las horas que tenemos en cuenta para la mano de obra aportada por el alumno, son las que corresponden a trabajos en el laboratorio (montaje del sistema de adquisición junto con el técnico) y las horas trabajadas junto con el tutor, que es el tiempo empleado ejerciendo como ingeniero. El total es de 50 horas.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

Para el cálculo del coste del tiempo dedicado por el técnico de laboratorio tenemos en cuenta que en el momento del montaje invirtió 6 horas junto al alumno; durante la puesta a punto del sistema y control de su funcionamiento, para cada experiencia, invirtió 2 horas en cada una, lo que supone 18 horas (9 experiencias); además de 5 horas en clases o tutorías al alumno. Todo esto supone 29 horas por parte del técnico de laboratorio.

**Sección mano de obra:**

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (€/h)</b>	<b>Cantidad (h)</b>	<b>Importe (€)</b>
MO01	Ingeniero (alumno)	22,00	35	770,00
MO02	Técnico de laboratorio	15,43	29	447,47
			<b>TOTAL</b>	<b>1547,47</b>

Tabla 5: Sección mano de obra.

A continuación, calculamos los costes de los materiales, básicamente los utilizados en el montaje del sistema de adquisición de datos. Concretamente, utilizamos 1 unidad de cada material, por lo que su coste es su suma total, que resulta directa.

**Sección materiales:**

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (€)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Importe (€)</b>
MA01	Rollo de cable termopar tipo k de 100m	41,90	1	41,90
MA02	Cinta adhesiva	6,51	1	6,51
MA03	RS PRO Silicone Grease 100 g Tube 494-124	7,61	1	7,61
MA04	Carrete de estaño	10,00	1	10,00
MA05	Material de oficina	5,00	1	5,00
MA06	Cable eléctrico de 1 mm <sup>2</sup>	10,99	1	10,99
			<b>TOTAL</b>	<b>82,01</b>

Tabla 6: Sección materiales.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

Seguimos con el cálculo de costes de las energías utilizadas en el proyecto, que son gas y electricidad. Primero explicamos cómo obtenemos el coste de la electricidad. Para ello, encontramos a continuación una tabla que recopila los distintos equipos que funcionan con electricidad empleados en el proyecto (ordenadores y tarjeta de adquisición de datos), junto con su consumo unitario en kW, su tiempo de utilización, y finalmente su consumo en kWh como multiplicación de los anteriores. Posteriormente, restará multiplicar el total de consumo del conjunto de los equipos utilizados por el precio del kWh de electricidad, para obtener el coste la cantidad utilizada de esta energía.

**Consumos de electricidad:**

Concepto	Ud	Consumo unitario (kW)	Horas	Consumo (kWh)
Ordenador laboratorio	kW	0,1	226	22,60
Ordenador alumno	kW	0,065	300	19,5
Ordenador profesor	kW	0,065	21	1,365
Tarjeta Agilent	kW	0,012	218	2,62
			<b>TOTAL</b>	<b>46,08</b>

Tabla 7: Consumos de electricidad.

Conocemos el tiempo que ha estado funcionando cada equipo porque, primero, el ordenador del laboratorio y la tarjeta de adquisición de datos han estado en marcha durante las experiencias, en un total de 218 horas, además añadimos otras 8 horas al ordenador del laboratorio por estar trabajando en el mismo antes y después de cada experiencia, lo que le supone 226 horas. Por otro lado, contamos las mismas horas que invierte el alumno en el trabajo como horas de funcionamiento del ordenador, por realizar el trabajo en su totalidad de manera informática. Finalmente, el tiempo de funcionamiento del ordenador del tutor estando trabajando en el proyecto lo situamos en 35 horas.

Podemos seguir con el cálculo del coste del gas utilizado en la caldera. En este caso, estamos utilizando gas natural de la red de la universidad. El gas natural está formado principalmente por metano (CH<sub>4</sub>), por lo que lo asemejamos a este gas para simplificar.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

---

Estamos realizando las experiencias con la caldera a la mínima temperatura, por lo que está trabajando a potencia mínima. Según las características técnicas de esta, para trabajar a potencia mínima consume 12,5 kW de metano para producir 10,7 kW de potencia calorífica, que es la potencia mínima que puede proporcionar.

Sabiendo el tiempo que han demorado las experiencias realizadas con la caldera para calentar el sistema de suelo radiante, que son 7 experiencias de 24 horas cada una, determinamos que el tiempo de funcionamiento de esta, y por tanto de utilización de gas, es de 168 horas.

Por tanto, para obtener el consumo en kWh de gas natural, simplemente multiplicamos el tiempo de funcionamiento por el consumo, es decir:

$$\text{Consumo}_{gas} = \text{Tiempo} \cdot \text{Potencia} = 168 \cdot 12,5 = 2100 \text{ kWh} \quad (14)$$

Finalmente, en esta tabla calculamos el coste de las energías utilizadas, multiplicando el consumo por el precio de cada una de estas.

**Sección energías:**

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (€/kWh)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Importe (€)</b>
GASN	Gas natural	0,050	2100	105,00
ELEC	Electricidad	0,115	46,08	5,30
			<b>TOTAL</b>	<b>110,30</b>

Tabla 8: Sección energías.

Para terminar, vamos a realizar las amortizaciones de los equipos utilizados en el proyecto, ya que todos ellos fueron adquiridos con anterioridad al mismo. Así, podemos reflejar el porcentaje del precio de cada equipo que ha sido amortizado por el uso en este proyecto.

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SUELO RADIANTE EN PROGRAMAS DE  
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE  
LOS MISMOS

Por una parte, consideramos para los ordenadores un periodo de amortización de 5 años, y con un valor residual del 20%. Esto supone un precio unitario de:

$$Precio_{U,Ordenador1} = \frac{500 - 500 \cdot 0,2}{5} = 80 \text{ €/año} = 0,04 \text{ €/h} \quad (15)$$

$$Precio_{U,Ordenador1} = \frac{500 - 500 \cdot 0,2}{5} = 80 \text{ €/año} = 0,04 \text{ €/h} \quad (16)$$

$$Precio_{U,Ordenador3} = \frac{600 - 600 \cdot 0,2}{5} = 96 \text{ €/año} = 0,05 \text{ €/h} \quad (17)$$

Para la tarjeta de adquisición de datos tomamos un periodo de amortización de 10 años, y con un valor residual del 10%.

$$Precio_{U,Tarjeta} = \frac{1650 - 1650 \cdot 0,1}{10} = 148,5 \text{ €/año} = 0,08 \text{ €/h} \quad (18)$$

**Sección equipos:**

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (€)</b>	<b>Cantidad (h)</b>	<b>Importe (€)</b>
EQ01	Ordenador del laboratorio	0,04	226	10,09
EQ02	Ordenador del alumno	0,04	300	13,39
EQ03	Ordenador del profesor	0,05	35	1,88
EQ04	Tarjeta de adquisición de datos Agilent 34970A	0,08	218	18,07
			<b>TOTAL</b>	<b>43,42</b>

Tabla 9: Sección equipos.

En cuanto a los programas que hemos utilizado, encontramos en primer lugar el paquete Office (Word, Excel, PowerPoint), cuya licencia es gratuita para estudiantes, así como la versión de AutoCAD utilizada para dibujar diagramas y planos, que es la versión gratuita para estudiantes.

### 10.3 Coste total

Esta última tabla suma todas las secciones anteriores para determinar el coste total del proyecto, con 1 unidad de cada sección.

<b>Sección</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Importe (€)</b>
Mano de obra	1	1547,47
Materiales	1	82,01
Energías	1	110,30
Equipos	1	43,42
	<b>Total sin IVA</b>	<b>1783,20</b>
	<b>IVA (21%)</b>	<b>374,47</b>
	<b>Total con IVA</b>	<b>2157,67</b>

Tabla 10: Coste total.

Se aplica el IVA (21%) sobre el importe resultante de la suma de las secciones, y el presupuesto resulta de 2157,67 € .

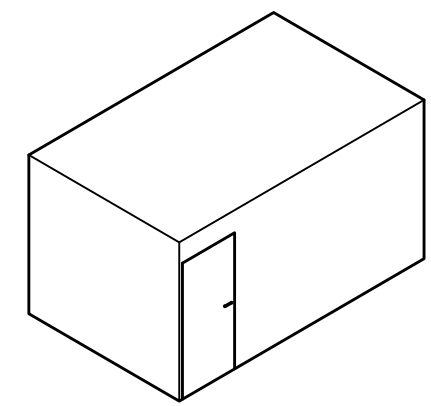
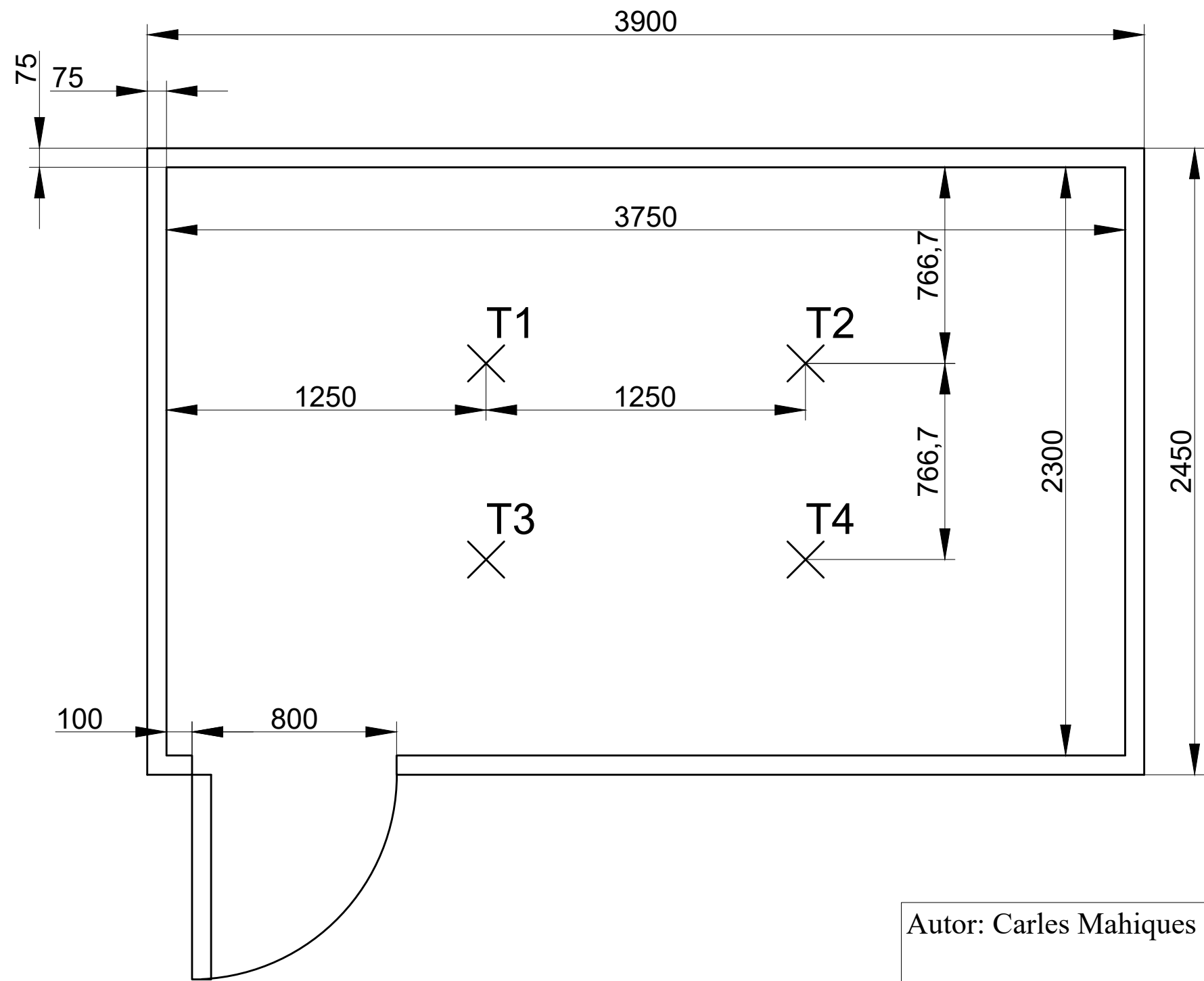



**Documento nº 3**

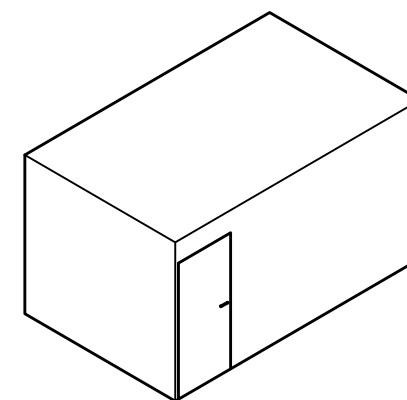
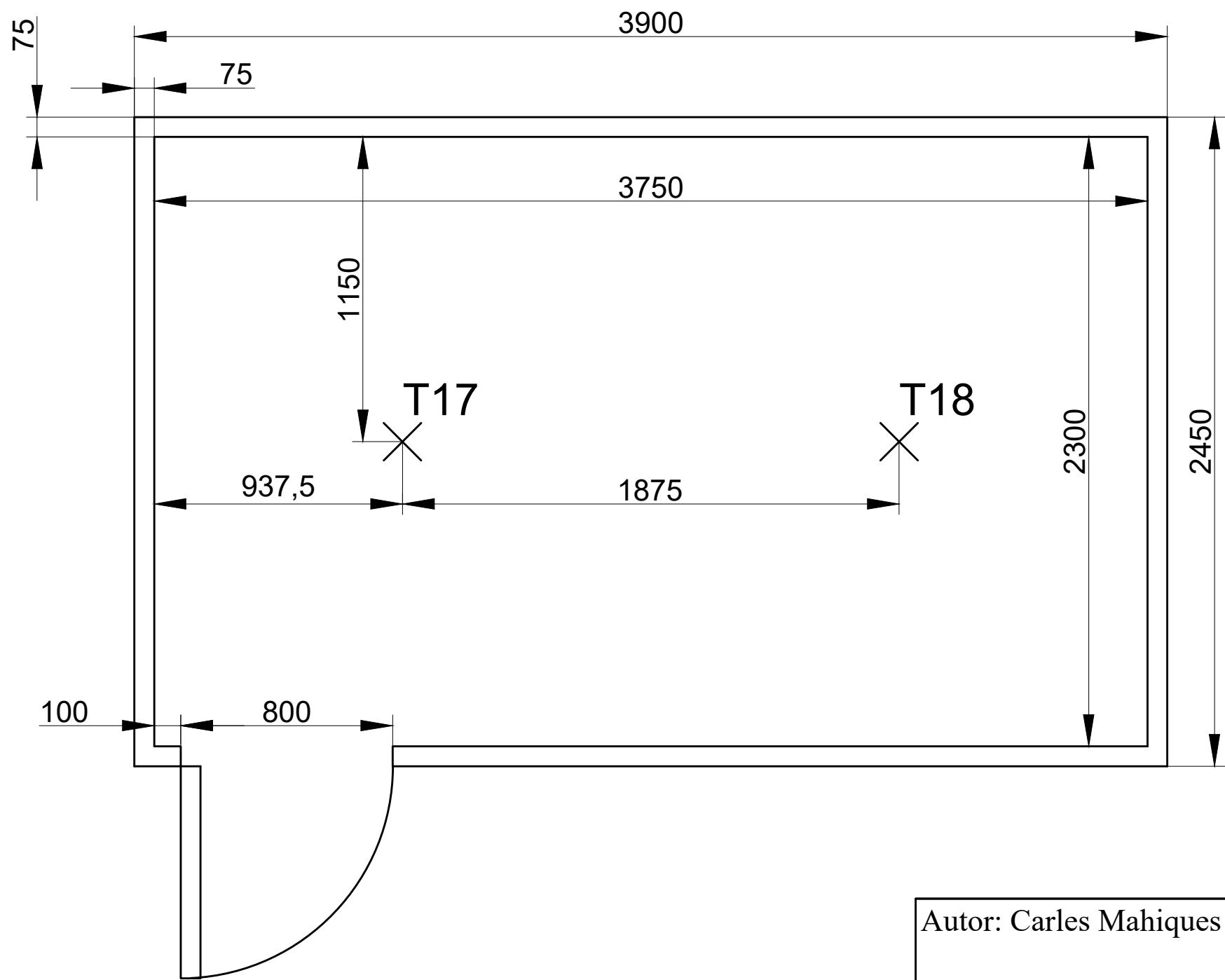
**PLANOS**

### **13. Índice de planos**


1. Vista en planta del suelo con los termopares instalados
2. Vista en planta del techo con los termopares instalados
3. Alzado de la pared grande trasera con los termopares instalados
4. Alzado de la pared grande delantera con los termopares instalados
5. Alzado de la pared lateral izquierda con los termopares instalados
6. Alzado de la pared lateral derecha con los termopares instalados

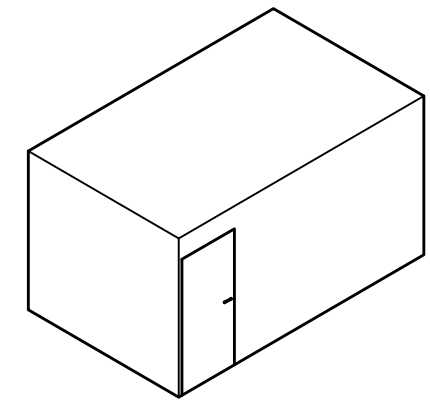
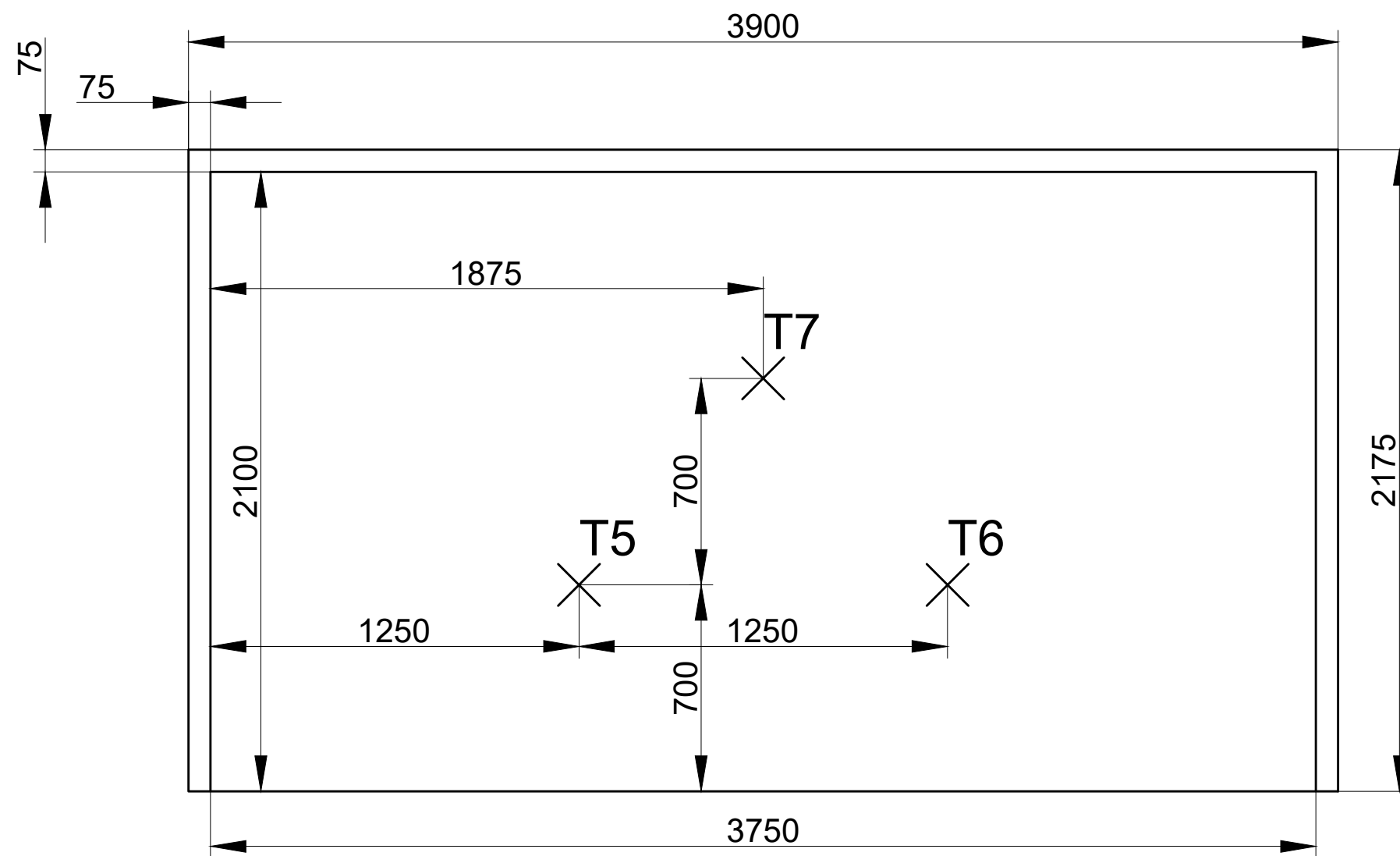


<p>Autor: Carles Mahiques Bataller</p> <p>Tutor: Emilio José Sarabia Escrivà</p>	<p>Proyecto Final de Grado:</p> <p>Estudio de los modelos de suelo radiante en programas de simulación energética y comprobación experimental de los mismos</p>
	<p>Plano: Vista en planta del suelo con los termopares instalados (cotas en mm)</p>
<p>Escala 1:20</p> <p>Plano N° 1</p> <p>Mayo 2019</p>	



<p>Autor: Carles Mahiques Bataller</p> <p>Tutor: Emilio José Sarabia Escrivà</p>	<p>Proyecto Final de Grado:</p> <p>Estudio de los modelos de suelo radiante en programas de simulación energética y comprobación experimental de los mismos</p>
--	---

	<p>Plano: Vista en planta del techo con los termopares instalados (cotas en mm)</p>	<p>Escala 1:20</p>
		<p>Plano N° 2</p>
		<p>Mayo 2019</p>



Autor: Carles Mahiques Bataller

Tutor: Emilio José Sarabia Escrivà

Proyecto Final de Grado:

Estudio de los modelos de suelo radiante en programas de simulación energética y comprobación experimental de los mismos

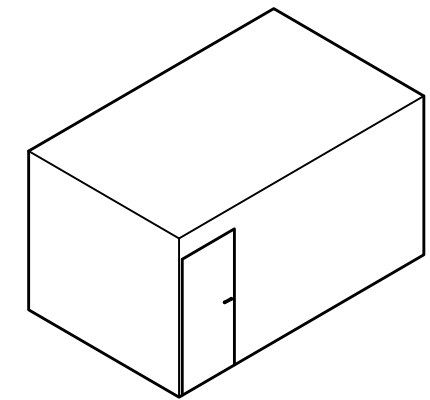
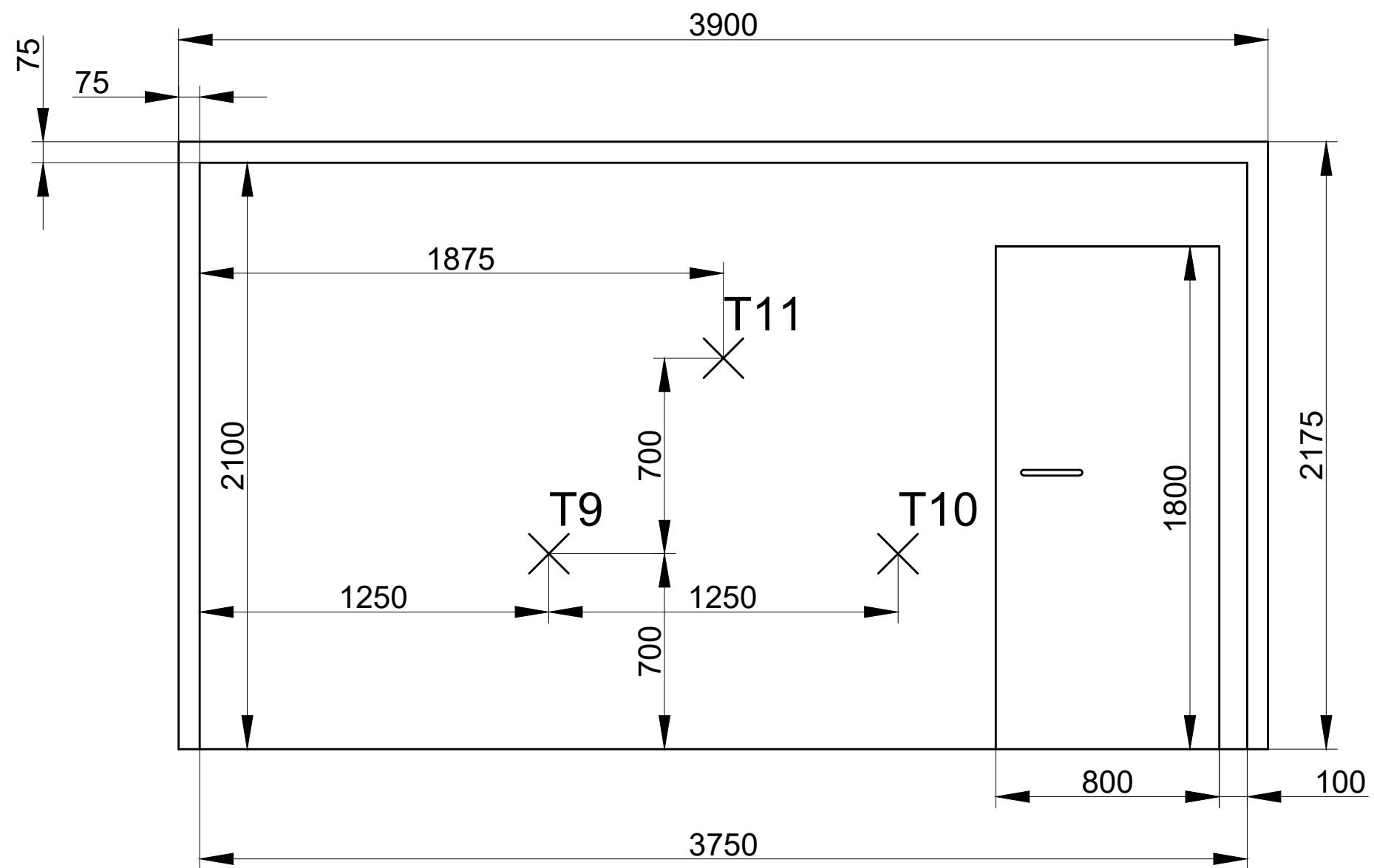


Plano: Alzado de la pared grande trasera con los termopares instalados (cotas en mm)

Escala 1:20

Plano N° 3

Mayo 2019



Autor: Carles Mahiques Bataller

Tutor: Emilio José Sarabia Escrivà

Proyecto Final de Grado:

Estudio de los modelos de suelo radiante en programas de simulación energética y comprobación experimental de los mismos

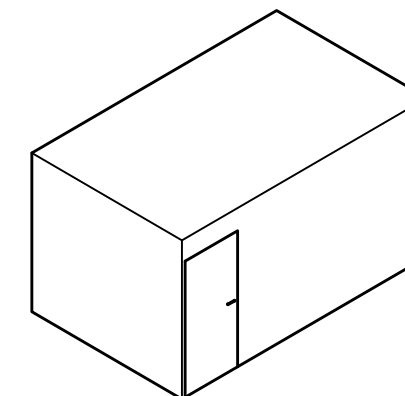
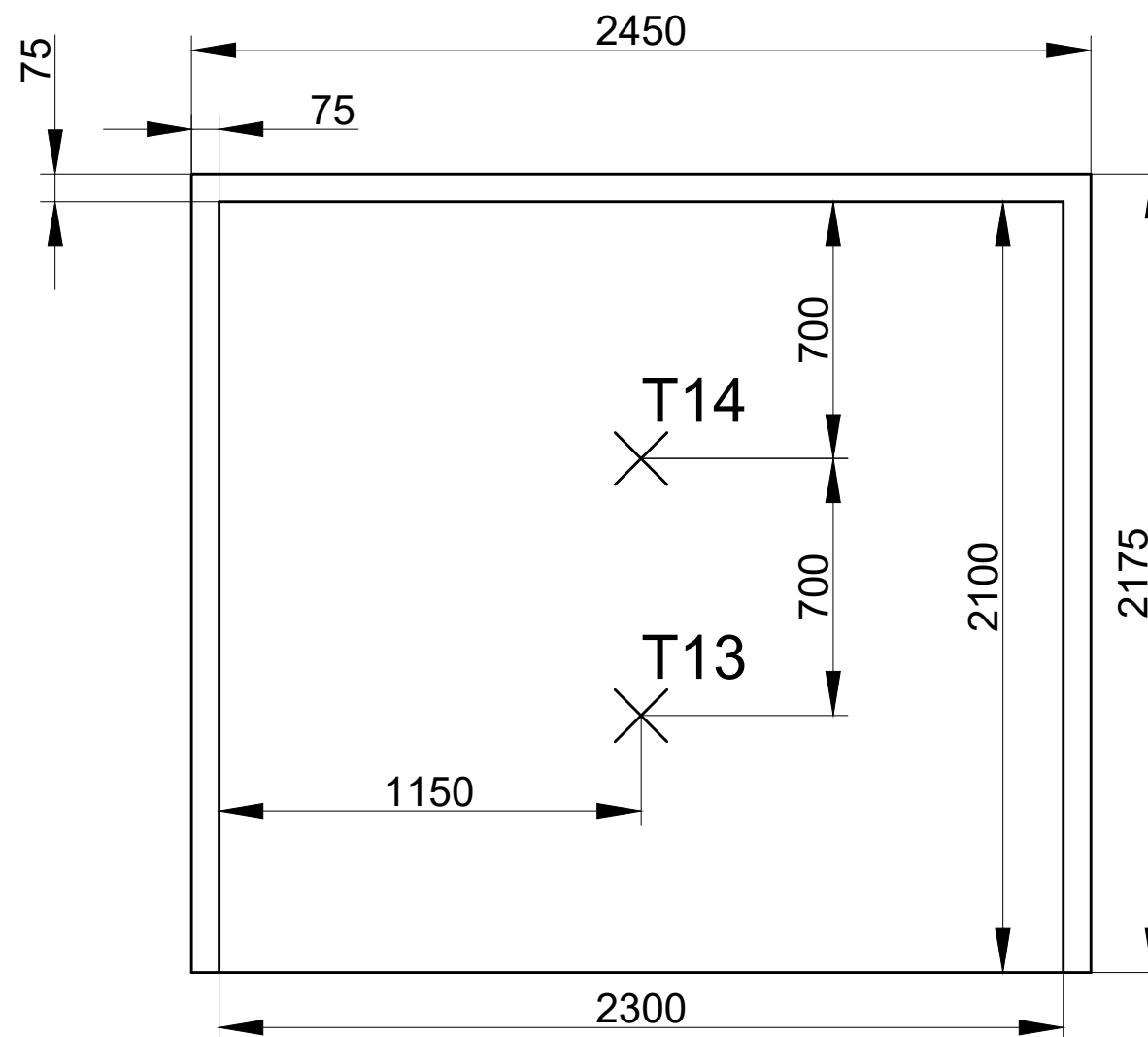


Plano: Alzado de la pared grande delantera con los termopares instalados (cotas en mm)


Escala 1:20

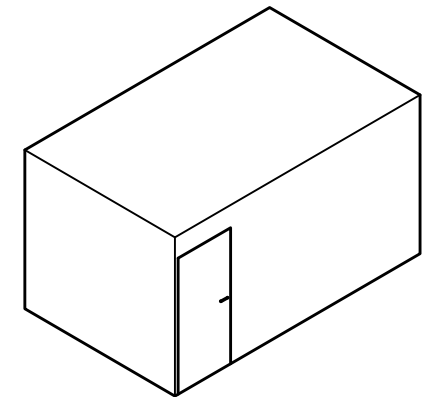
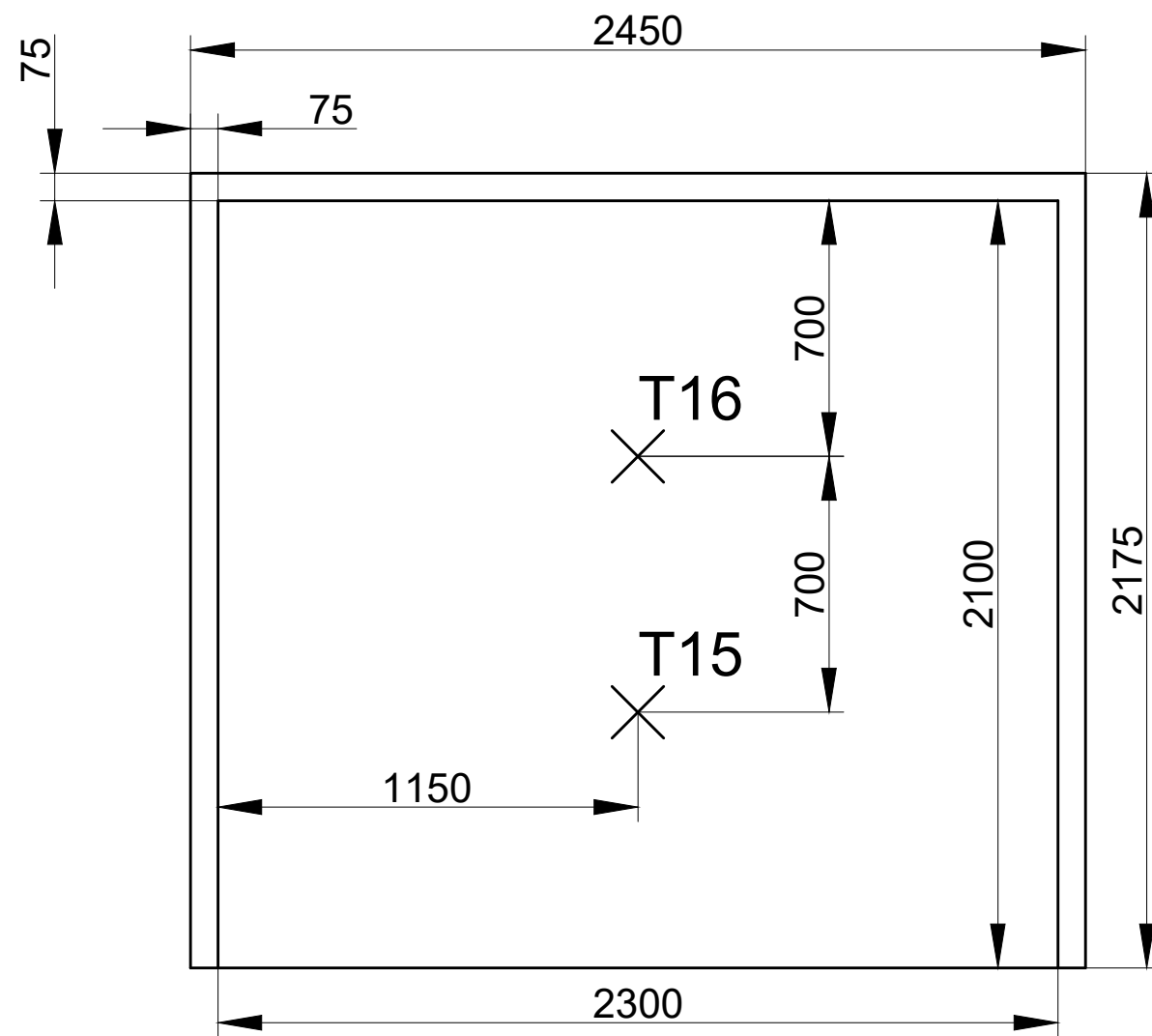
Plano N° 4

Mayo 2019



<p>Autor: Carles Mahiques Bataller</p> <p>Tutor: Emilio José Sarabia Escrivà</p>	<p>Proyecto Final de Grado:</p> <p>Estudio de los modelos de suelo radiante en programas de simulación energética y comprobación experimental de los mismos</p>
--	---

	<p>Plano: Alzado de la pared lateral izquierda con los termopares instalados (cotas en mm)</p>	<p>Escala 1:20</p>
		<p>Plano N° 5</p>
		<p>Mayo 2019</p>



Autor: Carles Mahiques Bataller

Tutor: Emilio José Sarabia Escrivà

Proyecto Final de Grado:

Estudio de los modelos de suelo radiante en programas de simulación energética y comprobación experimental de los mismos



Plano: Alzado de la pared lateral derecha con los termopares instalados (cotas en mm)

Escala 1:20

Plano N° 6

Mayo 2019



## **BIBLIOGRAFÍA**

### **Libros y documentos**

[1] Cejudo López, J. M., Domínguez Muñoz, F., Carrillo Andrés, A. & Gallardo Salazar, M. (2009). *Documentos técnicos de instalaciones en la edificación DTIE 9.05 Sistemas de climatización*. Madrid: ATECYR. ISBN-978-84-95010-32-2

[2] Rey Martínez, F. J. & Velasco Gómez, E. (2008). *Documentos técnicos de instalaciones en la edificación DTIE 9.04 Sistema de suelo radiante*. Madrid: ATECYR. ISBN-978-84-95010-23-0

[3] Çengel, Y. & Boles, M. (1995). *Termodinámica*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S.L. ISBN-970100910X, 9789701009109

[4] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (2008). *Guía técnica. Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios*. Madrid: IDAE.

[5] Sarabia Escrivà, E. J., Soto Francés, V., Pinazo Ojer, J. M. (2018). *SIMULACIÓN DE PROCESOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DEVS*. Valencia: CYTEF.

[6] Catálogo Saunier Duval: Saunier Duval ISOFAST C 28 E - ISOFAST F 28 E ISOFAST C 35 E - ISOFAST F 35 E. Recuperado de: [www.saunierduval.es](http://www.saunierduval.es)

[7] Catálogo Sedical: Bombas de rotor húmedo y seco para instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria. Recuperado de: [www.sedical.com](http://www.sedical.com)

[8] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (2007). *Comentarios. RITE 2007. Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios*. Madrid: IDAE.

### **Sitios web**

[9] Descripción de calderas y Generadores de Vapor. Recuperado de: <https://www.absorsistem.com/tecnologia/calderas/descripci%C3%B3n-de-calderas-y-generadores-de-vapor> [Accedido el 23 de abril de 2019].

[10] Radiadores eléctricos: ¿Cuáles son los mejores? Recuperado de:

<https://www.caloryfrio.com/calefaccion/radiadores/radiadores-electricos.html> [Accedido el 8 de mayo de 2019].

[11] ¿Sabes cómo funcionan las calderas eléctricas? Recuperado de:

<https://www.masagas.com/2017/01/26/sabes-como-funcionan-las-calderas-electricas/>

[Accedido el 13 de mayo de 2019].

[12] Qué es un colector solar. Recuperado de: <https://www.certicalia.com/blog/que-es-un-colector-solar> [Accedido el 9 de mayo de 2019].

[13] Fluido caloportador agua con anticongelante. Recuperado de:

<https://certificacionenergetica.info/fluido-caloportador-agua-con-anticongelante/>

[Accedido el 5 de mayo de 2019].

[14] Bomba de calor aire-aire. Recuperado de:

<https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor-aire-aire.html>

[Accedido el 25 de abril de 2019]

[15] Precio de la luz por horas. Recuperado de: <https://tarifaluzhora.es/> [Accedido el 27 de mayo de 2019]

[16] Características del gas natural. Recuperado de:

<https://www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/> [Accedido el 3 de junio de 2019]

[17] Coeficiente de determinación (R cuadrado). Recuperado de:

<https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>

[Accedido el 23 de mayo de 2019]

[18] Radiant system models. Recuperado de:

<https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-098.html>

[Accedido el 20 de abril de 2019]

[19] Programas para la simulación energética de edificios. Recuperado de:

<https://ovacen.com/programas-para-la-simulacion-energetica-de-edificios/>

[Accedido el 12 de junio de 2019]

