

Trabajo de Fin de Máster

Máster en Sistemas de Energía Térmica

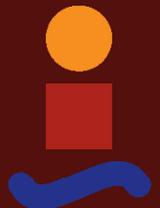
Sistema control óptimo suelo radiante: software,
hardware y pruebas

Autor: Javier Ostos Reina

Tutor: José Sánchez Ramos

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo de Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Térmica

Sistema control óptimo suelo radiante: software, hardware y pruebas

Autor:

Javier Ostos Reina

Tutor:

José Sánchez Ramos

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

A mi familia

A mis amigos

*A Daniel y Jose por su paciencia
y esfuerzo*

Resumen

El presente proyecto se ha estructurado en cuatro capítulos. En el primero de ellos se pone en contexto la importancia de varios conceptos primordiales para conocer el ámbito al que va enfocado el trabajo realizado, así como el término de *SRI* desarrollado en la *EPBD*. El concepto de Digital Twin se pone de manifiesto como importancia en el estudio del confort térmico en edificios tanto residenciales como no residenciales. En el segundo punto, se detalla la metodología que se ha seguido. En el tercer punto, se ha detallado, en primer lugar, el centro de experimentación donde se han desarrollado los experimentos realizados. Tras esto, se ha realizado la caracterización del edificio mediante la realización de una función de transferencia experimental (LBP) en ausencia de equipos de climatización. A continuación, se va a realizar la caracterización de dicho espacio mediante otra función de transferencia (LBS) con el funcionamiento de un equipo de acondicionamiento, en la que se va a poder obtener un sistema de predicción de la temperatura del aire en el interior de la habitación sensorizada en función del calor. Por último, mediante la instalación de un suelo radiante y la incorporación de bombas de calor aire/agua, se va a realizar el acoplamiento del panel con el recinto, obteniendo así, una tercera función de transferencia experimental en la cual se predice, en un tiempo relativamente corto de tiempo, la temperatura media del interior de la sala en función del calor del suelo transferido al aire del interior. Por último, se van a detallar algunos ejemplos de bibliografías encontradas, con las que se identifican otros métodos y estrategias de control del suelo radiante para sistemas de calefacción y/o refrigeración tanto en edificios residenciales como no residenciales.

Índice

Resumen	7
Índice	9
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	13
1 Introducción	15
<i>Concepto de Gemelo Digital</i>	15
<i>Tipología de Gemelo Digital</i>	15
<i>Historia de la tecnología de los gemelos digitales</i>	16
<i>Ventajas y beneficios de los gemelos digitales</i>	16
<i>Mercado e industria de los gemelos digitales</i>	16
<i>Aplicaciones</i>	17
<i>Ejemplos de gemelos digitales desarrollados en edificios</i>	18
<i>Principales empresas y panorama competitivo</i>	19
<i>Diferencias entre BIM y Gemelo Digital</i>	20
<i>Machine Learning y Gemelo Digital</i>	21
2 Metodología	23
2.1. <i>Objetivos</i>	23
2.2. <i>Esquema de la metodología</i>	23
2.3. <i>Datos climatológicos</i>	25
3 Aplicación	11
3.1. <i>Experimental facility</i>	11
3.2. <i>Caracterización del edificio</i>	21
3.3. <i>Caracterización del edificio + Split</i>	23
3.4. <i>Caracterización del suelo radiante</i>	34
3.5. <i>Acople del suelo radiante y recinto</i>	39
3.6. <i>Revisión del control en suelos radiantes</i>	43
4.¿Qué se ha propuesto?	48
5.CONCLUSIONES	49
Bibliografía	51

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Datasheet BdC Daikin.</i>	13
<i>Tabla 2. Datasheet BdC Gree.</i>	16
<i>Tabla 3. Factores de forma para T^a radiante media.</i>	36
<i>Tabla 4. Cálculo Q_{fluido} en instante inicial y anterior Regresión lineal.</i>	37
<i>Tabla 5. Parámetros de control para sistema de calefacción de suelo radiante [6]</i>	43
<i>Tabla 6. Clasificación de los métodos de control para sistema de calefacción con suelo radiante [6]</i>	43

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ciclo de Vida de la Edificación. BIM.</i>	20
<i>Figura 2: Esquema de metodología</i>	23
<i>Figura 3. Localización laboratorio.</i>	11
<i>Figura 4. Dimensiones físicas laboratorio.</i>	11
<i>Figura 5. Esquema de la instalación completa.</i>	12
<i>Figura 6. Curvas BdC Daikin (30°C - 45°C).</i>	14
<i>Figura 7. Curvas BdC Daikin (13°C - 22°C).</i>	14
<i>Figura 8. Curvas COP Daikin (30°C - 45°C).</i>	14
<i>Figura 9. Curvas EER Daikin (13°C - 22°C).</i>	15
<i>Figura 10. Curvas COP Gree (30°C - 45°C).</i>	15
<i>Figura 11. Curvas BdC Gree (30°C - 45°C).</i>	17
<i>Figura 12. Curvas EER Gree (13°C - 22°C).</i>	17
<i>Figura 13. Estación meteorológica.</i>	18
<i>Figura 14. Sensor T^a aire y localización en sala.</i>	18
<i>Figura 15. (1) Fachada exterior (1,5 m del suelo) / (2) Fachada interior (1,5 y 3 m) / (3) Partición interior (int.) (1,5 y 3 m) / (4) Partición interior (ext.) (pto. medio).</i>	18
<i>Figura 16. Sensor globo Sensor semiesfera.</i>	19
<i>Figura 17. Sensores en depósito Sensores en impulsión y retorno de BdC Caudalímetros.</i>	19
<i>Figura 18. Monitorización en panel radiante.</i>	20
<i>Figura 19. Sensores en panel radiante.</i>	20
<i>Figura 20: Ganancias solares [Wh]</i>	22
<i>Figura 21. LBP (01/06/2021 - 30/09/2021)</i>	22
<i>Figura 22: Temperatura interior medida VS. estimada</i>	23
<i>Figura 23. LBS.</i>	24
<i>Figura 24. Sistema (LBP - LBS).</i>	26
<i>Figura 25. Controlador Proporcional.</i>	27
<i>Figura 26. Controlador P.</i>	27
<i>Figura 27. Controlador Integral.</i>	28
<i>Figura 28. Controlador I.</i>	28
<i>Figura 29. Controlador Derivativo.</i>	29
<i>Figura 30. Controlador D.</i>	29
<i>Figura 31. Controlador Proporcional - Integral.</i>	30
<i>Figura 32. Controlador PI.</i>	30
<i>Figura 33. Controlador Proporcional - Derivativo.</i>	31

<i>Figura 34. Controlador PD.</i>	31
<i>Figura 35. Controlador Proporcional - Integral - Derivativo.</i>	32
<i>Figura 36. Controlador PID.</i>	32
<i>Figura 37. Comparativa PI, PD y PID.</i>	33
<i>Figura 38. Errores absolutos controladores PI, PD y PID.</i>	33
<i>Figura 39. Sensores interiores aire.</i>	34
<i>Figura 40. Disposición muros de la sala.</i>	35
<i>Figura 41. Recinto con panel radiante de estudio.</i>	39
<i>Figura 42. [7]</i>	45

1 INTRODUCCIÓN

El potencial de las tecnologías inteligentes en el sector de la edificación en la revisión de 2018 de la EPBD (*‘European Energy Performance of Buildings Directive’*) y se introdujo el concepto de SRI (*‘Smart Readiness Indicator’*). Este indicador permite la clasificación de la preparación inteligente de los edificios, es decir, la capacidad de los edificios (o unidades de edificios) para adaptar su funcionamiento a las necesidades del ocupante, optimizando también la eficiencia energética y el rendimiento general, y para adaptar su funcionamiento en reacción a las señales de red (flexibilidad energética). El SRI concienciará a los propietarios y a los ocupantes de los edificios sobre el valor que hay detrás de la automatización de los edificios y la supervisión electrónica de los sistemas técnicos de los mismos, y debería dar confianza a los ocupantes sobre el ahorro real de las nuevas funcionalidades mejoradas.

Entra en juego el concepto de Gemelo Digital (*‘Digital Twin’*). Este término es uno de los avances más importantes en el desarrollo y evolución de la denominada Industria 4.0, con una clara tendencia ascendente en el ámbito de los edificios, tanto en domótica como en climatización y automatización.

Concepto de Gemelo Digital

Un gemelo digital es un modelo virtual diseñado para reflejar con exactitud un objeto físico. El objeto estudiado, por ejemplo, un aerogenerador, está equipado con varios sensores relacionados con áreas vitales de funcionalidad. Estos sensores producen datos sobre diferentes aspectos del funcionamiento del objeto físico, como la producción de energía, la temperatura, las condiciones meteorológicas, etc. Estos datos se transmiten a un sistema de procesamiento y se aplican a la copia digital.

Una vez que se dispone de estos datos, el modelo virtual puede utilizarse para realizar simulaciones, estudiar problemas de rendimiento y generar posibles mejoras, todo ello con el objetivo de generar valiosos conocimientos, que luego pueden aplicarse de nuevo al objeto físico original.

Respecto a las diferencias que se presentan entre un gemelo digital y una simulación, ambas utilizan modelos digitales para reproducir los distintos procesos de un sistema. Un gemelo digital es en realidad un entorno virtual, lo que hace mucho más rico su estudio. La diferencia entre estos es en gran medida una cuestión de escala: mientras que una simulación suele estudiar un proceso concreto, un gemelo digital puede ejecutar cualquier número de simulaciones útiles para estudiar múltiples procesos.

Además de estas diferencias, por ejemplo, las simulaciones no suelen beneficiarse de tener datos en tiempo real, sin embargo, los gemelos digitales están diseñados en torno a un flujo de información bidireccional que se produce primero cuando los sensores del objeto proporcionan datos relevantes al procesador del sistema y luego ocurre de nuevo cuando los conocimientos creados por el procesador se comparten con el objeto original.

Al disponer de datos mejores y constantemente actualizados relacionados con una amplia gama de áreas, combinados con la potencia de cálculo añadida que acompaña a un entorno virtual, los gemelos digitales son capaces de estudiar más cuestiones desde muchos más puntos de vista que las simulaciones estándar, con un mayor potencial final para mejorar los productos y los procesos.

Tipología de Gemelo Digital

Existen varios tipos de gemelos digitales en función del nivel de aumento del producto. La mayor diferencia entre estos gemelos es la aplicación a la que van destinados. Es habitual que coexistan diferentes tipos de gemelos digitales dentro de un mismo proceso o sistema.

- Componentes gemelos / Partes gemelas.
Los componentes gemelos son la unidad básica de un gemelo digital, el ejemplo más pequeño de un

componente en funcionamiento. Las partes gemelas son más o menos lo mismo, pero pertenecen a componentes de menor importancia.

- **Activos gemelos.**
Cuando dos o más componentes trabajan juntos, forman lo que se conoce como un activo. Los activos gemelos permiten estudiar la interacción de esos componentes, creando una gran cantidad de datos de rendimiento que pueden llegar a ser procesados y luego convertidos en información procesable.
- **Gemelos de sistema o unidad.**
El siguiente nivel de ampliación es el de los gemelos de sistema o unidad, los cuales permiten ver cómo los diferentes activos se unen para formar un sistema completo que funciona. Los gemelos de sistema proporcionan visibilidad sobre la interacción de los activos y pueden sugerir mejoras de rendimiento.
- **Gemelos de proceso.**
Los gemelos de proceso, el nivel macro de ampliación, revelan cómo los sistemas trabajan juntos para crear una instalación de producción completa. Los gemelos de proceso pueden ayudar a determinar los esquemas de sincronización precisos que, en última instancia, influyen en el rendimiento general.

Historia de la tecnología de los gemelos digitales

La idea de la tecnología de los gemelos digitales se expresó por primera vez en el año 1991, con la publicación de *Mirror Worlds*, de David Gelernter. Sin embargo, se atribuye al Dr. Michael Grieves (entonces profesor de la Universidad de Michigan) la primera aplicación del concepto de gemelos digitales a la fabricación en 2002 y el anuncio formal del concepto de software de gemelos digitales. Finalmente, John Vickers, de la NASA, introdujo un nuevo término – “gemelo digital” – en el año 2010.

Sin embargo, la idea central de utilizar un gemelo digital como medio de estudio de un objeto físico se puede presenciar en realidad mucho antes. De hecho, se puede decir con razón que la NASA fue pionera en el uso de la tecnología de gemelos digitales durante sus misiones de exploración espacial de la década de 1960, cuando cada nave espacial que viajaba se replicaba exactamente en una versión terrestre que se utilizaba con fines de estudio y simulación por el personal de la NASA que formaba parte de las tripulaciones de vuelo.

Ventajas y beneficios de los gemelos digitales

Los gemelos digitales presentan una serie de ventajas y beneficios, los cuales se exponen a continuación:

Mejor I+D

El uso de gemelos digitales permite una investigación y un diseño más eficaces de los productos, ya que se crean abundantes datos sobre los resultados probables del rendimiento. Esta información puede ayudar a las empresas a perfeccionar sus productos antes de iniciar la producción.

Mayor eficiencia

Incluso después de que un nuevo producto haya entrado en producción, los gemelos digitales pueden ayudar a reflejar y supervisar los sistemas de producción, con la vista puesta en lograr y mantener la máxima eficiencia a lo largo de todo el proceso de fabricación.

Fin de la vida útil de los productos

Los gemelos digitales pueden incluso ayudar a los fabricantes a decidir qué hacer con los productos que llegan al final de su vida útil y necesitan recibir un tratamiento final, mediante el reciclaje u otras medidas. Mediante el uso de gemelos digitales, pueden determinar qué materiales del producto pueden ser aprovechados.

Mercado e industria de los gemelos digitales

Aunque los gemelos digitales son muy apreciados por lo que ofrecen, su uso no está garantizado para todos los

fabricantes o todos los productos creados. No todos los objetos son lo suficientemente complejos como para necesitar el flujo intenso y regular de datos de los sensores que requieren los gemelos digitales. Tampoco siempre merece la pena, desde el punto de vista financiera, invertir recursos importantes en la creación de un gemelo digital (hay que tener en cuenta que un gemelo digital es una réplica exacta de un objeto físico, lo que puede hacer que su creación sea costosa).

Por otro lado, numerosos tipos de proyectos se benefician del uso de modelos digitales:

- Proyectos físicamente grandes: Edificios, puentes y otras estructuras complejas sujetas a estrictas normas de ingeniería.
- Proyectos mecánicamente completos: turbinas a reacción, automóviles y aviones. Los gemelos digitales pueden ayudar a mejorar la eficiencia de la maquinaria complicada y los motores gigantes.
- Equipos de energía: esto incluye tanto los mecanismos para generar energía como para transmitirla.
- Proyectos de fabricación: los gemelos digitales son excelentes para ayudar a racionalizar la eficiencia de los procesos, como se puede encontrar en entornos industriales con sistemas de máquinas que funcionan conjuntamente.

Por lo tanto, las industrias que consiguen un mayor éxito con los gemelos digitales son las que se dedican a productos o proyectos a gran escala:

- Ingeniería (sistemas).
- Fabricación de automóviles.
- Producción de aviones.
- Diseño de vagones.
- Construcción de edificios.
- Fabricación.
- Servicios de energía.

Aplicaciones

Los gemelos digitales ya se utilizan ampliamente en las siguientes aplicaciones:

- Equipos de generación de energía.
Los grandes motores, como los de los aviones, las locomotoras y las turbinas de generación de energía – se benefician enormemente del uso de gemelos digitales, especialmente para ayudar a establecer plazos de mantenimiento que se necesitan regularse.
- Estructuras y sus sistemas.
Las grandes estructuras físicas, como los grandes edificios o las plataformas de perforación en alta mar, pueden mejorarse mediante gemelos digitales, especialmente durante su diseño. También es útil para diseñar los sistemas que operan dentro de esas estructuras, como los sistemas de climatización.
- Operaciones de fabricación.
Dado que los gemelos digitales están pensados para reflejar todo el ciclo de vida de un producto, no es de extrañar que los gemelos digitales se hayan convertido en algo omnipresente en todas las etapas de la fabricación, guiando los productos desde el diseño hasta el producto terminado y todos los pasos intermedios. (mejorar el funcionamiento del taller, desarrollo del coche autónomo, personalización del diseño, mantenimiento predictivo, predicción del empaquetado de materiales, optimización del diseño de almacén, creación de redes logísticas).
- Servicios sanitarios.
Al igual que los productos pueden perfilarse mediante el uso de gemelos digitales, los pacientes que reciben servicios sanitarios también pueden hacerlo. El mismo tipo de sistema de datos generados por sensores puede utilizarse para hacer un seguimiento de diversos indicadores de salud y generar información clave (mejora de la eficiencia de la eficiencia operativa de las operaciones sanitarias, desarrollo del cuidado personalizado).
- Industria del automóvil.

Los coches representan muchos tipos de sistemas complejos que funcionan conjuntamente, y los gemelos digitales se utilizan ampliamente en el diseño de automóviles, tanto para mejorar el rendimiento de los vehículos como para aumentar la eficiencia en torno a su producción.

- **Planificación urbana.**

Los ingenieros civiles y otros implicados en actividades de planificación urbana se ven muy favorecidos por el uso de gemelos digitales, que pueden mostrar datos espaciales en 3D y 4D en tiempo real y también incorporar sistemas de realidad aumentada en entornos construidos.

Ejemplos de gemelos digitales desarrollados en edificios

En este punto, se exponen varios ejemplos de la aplicación de Gemelos Digitales en los entornos de la construcción y modelaje de edificios:

- **Sensores de temperatura ambiente a partir de gemelos digitales. [1]**

En esta tesis de licenciatura se investigó la influencia de la posición de un sensor de temperatura en el control de la calefacción. Esto es importante para optimizar el consumo de energía y el confort en las habitaciones interiores.

Los sensores de temperatura en los sistemas de calefacción a menudo miden una combinación de temperatura del aire y radiación. En la planificación digital, el control del confort térmico en los edificios es, por lo tanto, una tarea exigente. Para el objetivo de la tesis, puede ser útil crear un gemelo digital del edificio. Este gemelo digital contiene modelos con los que se pueden representar procesos físicos. Por ejemplo, la distribución de la temperatura en una habitación debido a un sistema de ventilación se puede mostrar gráficamente y la tecnología de control se puede mejorar. Los modelos simplificados a menudo asumen una temperatura del aire homogéneamente mezclada, que no es adecuada para optimizar el posicionamiento de los sensores de temperatura. El objetivo del trabajo es procesar el conocimiento en una forma útil para la industria de la construcción y utilizar procesos y herramientas que están disponibles para un amplio grupo de usuarios en la actualidad. Para este propósito, se han utilizado varias características de software recientemente implementadas de IDA ICE para evaluar su idoneidad para mapear el confort térmico y el consumo de energía en el gemelo digital.

- **Marco de gemelos digitales para mejorar la eficiencia energética y el confort de los ocupantes en edificios públicos y comerciales. [2]**

El control predictivo de modelos (CPM) puede utilizarse en el contexto de la automatización de edificios para mejorar la eficiencia energética y el confort de los ocupantes. Lo ideal es que el algoritmo del control predictivo tenga en cuenta el uso actual y el previsto del entorno controlado junto con el estado inicial y la previsión meteorológica para planificar un confort y una eficiencia energética óptimos.

Esto implica la necesidad de una aplicación de CPM que: 1) tenga en cuenta múltiples objetivos, 2) pueda recurrir a múltiples fuentes de datos, y 3) ofrezca un enfoque para integrarse eficazmente con sistemas de automatización de edificios heterogéneos para que el enfoque reutilizable en diferentes instalaciones.

Para ello, este artículo presenta un diseño e implementación de un marco de trabajo para los gemelos digitales de los edificios, en el que los entornos controlados se representan como entidades digitales. En este marco, los gemelos digitales constituyen modelos parametrizados que se integran en un algoritmo de control genérico que utiliza datos sobre las previsiones meteorológicas, la ocupación actual y planificada, así como el estado actual del entorno controlado para realizar el CPM. Se accede a estos datos a través de una capa de datos genérica para permitir un acceso uniforme a los datos. Esto permite que el marco cambie sin problemas entre las aplicaciones de simulación y las de la vida real y reduce la barrera para reutilizar la aplicación en un entorno de control diferente.

Se demuestra una aplicación del marco de trabajo del gemelo digital en un caso de estudio en la Universidad del Sur de Dinamarca, donde se ha utilizado un gemelo digital para controlar la calefacción y la ventilación.

A partir del caso de estudio, se observa que se puede pasar del control basado en reglas al control predictivo

de modelos sin efectos adversos inmediatos sobre el confort o el consumo de energía. También identifican el potencial de aumento de la eficiencia energética, así como la posibilidad de planificar el consumo de energía en función de la producción local de electricidad o de las condiciones del mercado, manteniendo al mismo tiempo el confort de los ocupantes.

▪ **Gemelo digital para la inducción industrial. Equipos de calefacción. [3]**

EFD Induction quiere estudiar la posibilidad de desarrollar un gemelo digital para sus equipos de calentamiento por inducción. Un gemelo digital tiene una variedad de usos, tales como la monitorización, el mantenimiento predictivo y la comprobación de escenarios hipotéticos. Esta tesis estudiará cómo se puede desarrollar un gemelo digital en beneficio de los clientes de EFC Induction en lo que respecta a las pruebas de aplicación de calentamiento por inducción y compararlo con los métodos de prueba existentes. Se ha desarrollado un gemelo digital que consta de un modelo de aplicación, un modelo de convertidor, controlador de punto de ajuste, almacenamiento de datos e interfaz del convertidor. El enfoque ha sido en una conexión entre los programas a través de un eje central, llamado Data Exchange, con la implementación de un protocolo de mensajería IoT. Se ha establecido una conexión entre los modelos y se ha desarrollado una base para el gemelo digital para los equipos de calefacción por inducción. Se han realizado pruebas de la aplicación real y el gemelo digital se han ejecutado para comparar el desarrollo de la temperatura en la aplicación. El uso del gemelo digital para los clientes en esta etapa es monitorizar el proceso de calentamiento por inducción durante las pruebas.

▪ **Gemelo digital como una Base para el Diseño de Estrategias de Control en Edificios [4]**

Esta contribución describe un método basado en la simulación para el diseño y la evaluación de estrategias de control de edificios planificados. El enfoque consiste en una combinación de un gemelo digital del edificio real y sistema de climatización, modelado como un modelo físico de Modelica y el paquete de software openHAB, para la implementación de las correspondientes estrategias de control del edificio. Para ello, openHAB y el modelo de Modelica están acoplados bidireccionalmente en tiempo real. De este modo, se pueden probar nuevas estrategias de control y mejorarlas bajo la consideración del comportamiento dinámico del sistema en la fase de diseño del edificio. Si el comportamiento del sistema del modelo de simulación es lo suficientemente aproximado al sistema real, el gemelo digital puede ser sustituido por el edificio construido y la estrategia de control se comportará de forma adecuada durante el funcionamiento del sistema real casi sin cambios.

Principales empresas y panorama competitivo

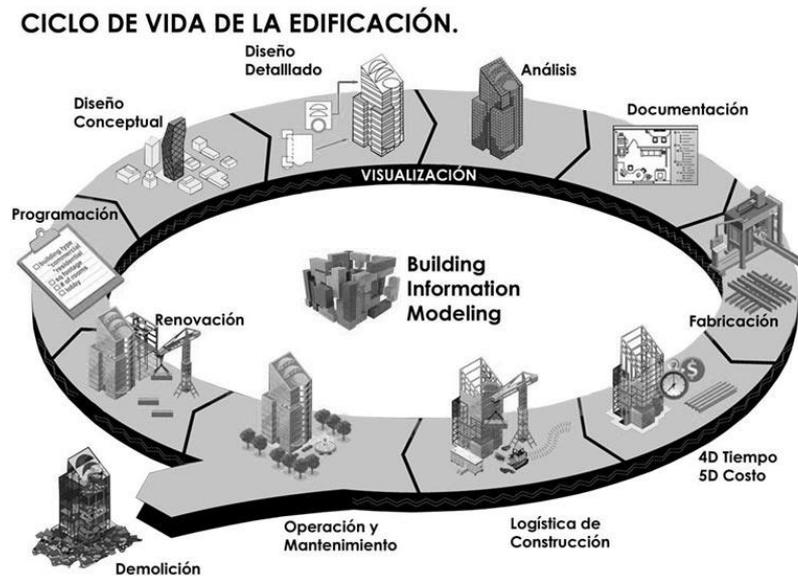
El mercado mundial de mercado digitales está moderadamente fragmentado, con un gran número de pequeñas y medianas empresas que representan la mayor parte de los ingresos del mercado mundial. Las principales empresas cuentan con instalaciones bien establecidas y entran en adquisiciones y fusiones, así como en acuerdos estratégicos, y participan en diversas actividades e iniciativas de investigación y desarrollo para desarrollar y desplegar tecnologías y productos nuevos y más eficientes en el mercado de los gemelos digitales. Algunos de los principales operados en el mercado de gemelos digitales, según el top 10 de Revenue (año 2021), son:

- Microsoft Corporation.
- Oracle Corporation.
- IBM Corporation.
- PTC Inc.
- Ansys Inc.
- General Electric Company.
- SAP SE.
- Siemens AG.
- Hexagon AB.
- Aveva Group PLC.

Diferencias entre BIM y Gemelo Digital

Cabe destacar, en el aspecto del modelado y construcción de Edificios, el concepto de BIM (*Building Information Modeling*).

La metodología BIM se centra en el Modelado de la Información para la Construcción y/o Modelado de la Información para la Edificación. Según *la buildingSMART*, BIM se define como: “Una metodología de trabajo colaborativa para la concepción y gestión de proyectos de edificación y obra civil. Dicha metodología centraliza toda la información de un proyecto – geométrica o 3D, tiempo o 4D, costes o 5D, ambiental o 6D, y mantenimiento o 7D – en un modelo digital desarrollado por todos sus agentes”.



Existen ciertas similitudes en el ambiente de la Edificación entre BIM y los Gemelos Digitales.

A continuación, se enumeran las diferencias principales que existen entre ambos conceptos:

1. BIM es para el Diseño y Construcción.

BIM está pensado para la colaboración y la visualización del diseño y construcción, no para el funcionamiento y el mantenimiento. La intención de BIM no es generar un modelo vivo del edificio operativo, sino ayudar a la arquitectura y a la construcción del edificio.

El objetivo de BIM ha sido crear un proceso de diseño y construcción colaborativo que visualice los aspectos físicos y funcionales de un edificio. La visualización en la fase de diseño y creación de prototipos de una nueva construcción ha sido esencial para la comprensión de las relaciones espaciales. A diferencia de los gemelos digitales, este modelo de información física se ajusta a los edificios en vuelo, no a los ocupados y utilizados diariamente.

2. BIM no está diseñado para una respuesta operativa en tiempo real.

Los gemelos digitales se están reconociendo rápidamente como la parte más valiosa de la base tecnológica de un edificio: es una imagen completa de su entorno construido en tiempo real. Un gemelo digital puede proporcionarle información sobre el estado actual de los subsistemas del edificio, cómo se ven afectados por el comportamiento de los ocupantes, cuándo puede fallar activos como la climatización o la iluminación, y mucho más. Es un modelo que evoluciona con el tiempo, para ofrecer más valor con cada nueva etapa del ciclo de vida del activo. BIM es una entrada de datos clave para cualquier Gemelo Digital, pero BIM por sí solo no puede responder a las preguntas operativas que los gestores de instalación pueden tener sobre la optimización de las operaciones.

3. BIM se centra en los edificios y no en las personas.

Según Gartner, la próxima evolución del Gemelo Digital verá cómo las aplicaciones van más allá de los activos para incluir organizaciones enteras o el Gemelo Digital de una Organización. Esto significa que las personas, los procesos y los comportamientos también serán fuentes de datos importantes que darán a los Gemelos Digitales un contexto aún mayor sobre el entorno construido.

Si las tendencias en el sector de la construcción de edificios continúan gravitando hacia la comprensión de los ocupantes y la competencia en la experiencia del lugar de trabajo, el Gemelo Digital sustituirá sin duda al software BIM incluso en la fase de diseño y construcción del ciclo de vida de un activo. A medida que se considera en primera instancia, la repercusión del comportamiento de las personas y la flexibilidad, los modelos que se creen irán destinados a la mejora del confort y un estable bienestar.

Machine Learning y Gemelo Digital

Otro de los conceptos claves para el desarrollo de la industria 4.0 es el de *Machine Learning* ('Aprendizaje Automático'). Este término hace referencia a una disciplina del campo de la Inteligencia Artificial que, mediante algoritmos, proporciona a los ordenadores la capacidad de identificar patrones en una gran cantidad de datos y de elaborar predicciones (análisis predictivo). Este aprendizaje permite a los ordenadores realizar tareas específicas de forma autónoma, es decir, sin necesidad de ser programados.

Existen distintos algoritmos de *Machine Learning*, pudiéndose dividir en varias categorías:

- **Aprendizaje por refuerzo:** el objetivo principal es que el algoritmo aprenda a partir de la propia experiencia. Esto quiere decir, que sea capaz de tomar la mejor decisión ante distintas situaciones de acuerdo a un proceso de prueba y error en el que se recompensan las decisiones correctas. Este tipo de algoritmo se está utilizando en la actualidad para el reconocimiento facial, realización de diagnósticos médicos o la clasificación del AND.
- **Aprendizaje supervisado:** están basados en un sistema de etiquetas asociadas a unos datos que les permiten tomar decisiones o hacer predicciones. Por ejemplo, la detección de spam que etiqueta un *e-mail* como *spam* o no dependiendo de los patrones que ha aprendido del histórico de correos.
- **Aprendizaje no supervisado:** este tipo de algoritmo no cuenta con un conocimiento previo. Se enfrentan a la dificultad de todos los datos en su conjunto con el objetivo de encontrar patrones que permitan organizarlos de alguna manera. Por ejemplo, en el campo del *marketing*, se utilizan para extraer de datos masivos provenientes de las redes sociales y crear las campañas de publicidad segmentadas.

A continuación, se muestran las aplicaciones actuales en las que se está haciendo uso del *Machine Learning*:

- **Ciberseguridad:** los nuevos antivirus y motores de detección de malware para potenciar el escaneado, acelerar la detección y mejorar la habilidad de reconocer anomalías.
- **Búsquedas:** los motores de búsqueda se sirven del aprendizaje automático para optimizar sus resultados en función de su eficacia, midiendo la misma a través de los clics del Usuario.
- **Redes sociales:** se utiliza el aprendizaje automático para la reducción de *spam* o contenidos no permitidos de cualquier plataforma.
- **Medicina:** en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) utilizan esta tecnología para la detección anticipada del cáncer de mama, además de una alta eficacia para detectar neumonía y enfermedades de la retina que pueden llegar a provocar ceguera.
- **Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN):** a partir de la comprensión del lenguaje humano, asistentes virtuales pueden traducir instantáneamente de un idioma a otro, reconocer la voz del usuario e incluso analizar sus sentimientos.

Desde una perspectiva básica, los conceptos de Gemelo Digital y *Machine Learning* utilizan y digieren datos con el fin de mejorar su funcionalidad y ofrecer valiosas perspectivas a desarrolladores, pero la forma en que estas tecnologías obtienen los datos es muy diferente.

El principal aspecto que diferencia a estas tecnologías es que el *Machine Learning* trabaja normalmente recogiendo sus datos iniciales a partir de distinciones. Es decir, que la tecnología comienza su trabajo y "empieza

a pensar” por sí misma una vez que se ha fijado un objetivo y se ha distinguido con precisión. Por otro lado, el Digital Twin, para que comience a recopilar datos con éxito, necesita estar conectado directamente a su gemelo físico. Esto funciona esencialmente conectando sensores al gemelo físico y esto actúa como puente entre la realidad y la simulación. Esto significa que si se producen cambios en el gemelo físico, los mismos cambios se reflejarán en el modelo digital.

En cuanto a un enfoque derivado a la integración de ambas tecnologías en edificios, se están desarrollando varios estudios e implementaciones en este ámbito. Un ejemplo es el del paper “*Applying Machine Learning and Digital Twinning for the Live Assessment of Thermal Comfort in Buildings*” [5]. Investigaciones recientes han demostrado el potencial de combinar BIM y IoT (‘Internet of Things’) para la producción de Gemelos Digitales representados en entornos de visualización 3D pueden permitir experiencias muy intuitivas de las interacciones entre el ser humano y el edificio. Además, se pueden aplicar técnicas de Machine Learning para extraer nuevos conocimientos de los datos históricos de los edificios y actualizar la base de conocimientos del Digital Twin. Los gemelos digitales con capacidad de aprendizaje basado en datos serán de gran valor práctico para temas muy complejos como el confort térmico. Las predicciones precisas del confort térmico dependen de numerosas variables, y de complejas ecuaciones o simulaciones que son computacionalmente costosas. En este artículo, se propone un modelo de predicción del confort térmico basado en datos y su integración en la arquitectura de los Digital Twins creados mediante sistemas BIM e IoT. Para ello, se ha utilizado un algoritmo supervisado para entrenar un modelo de clasificación basado en la base de datos ASHRAE Global Thermal II. Se ha realizado una implementación parcial del sistema propuesto y se ha comprobado la eficacia general del método propuesto para la predicción del confort térmico realizando finalmente un análisis comparativo de los resultados. Este trabajo se ha realizado a partir de resultados obtenidos en anteriores proyectos de confort térmicos en edificios aplicados con la tecnología del Gemelo Digital cuyas referencias se encuentran en el mismo artículo.

2 METODOLOGÍA

2.1. Objetivos

Los objetivos del presente proyecto se resumen en los siguientes puntos:

- Formación de caracterización inversa.
- Caracterización de un edificio de estudio a partir del desarrollo de Líneas base con el que se pueda establecer un sistema de predicción con/sin equipo de climatización.
- Participación en experimentación en modo calefacción y análisis de resultados.
- Desarrollo de algoritmos para control convencional.
- Acoplamiento edificio-instalación.

2.2. Esquema de la metodología

A continuación, se muestra el esquema de la metodología que engloba al presente proyecto:

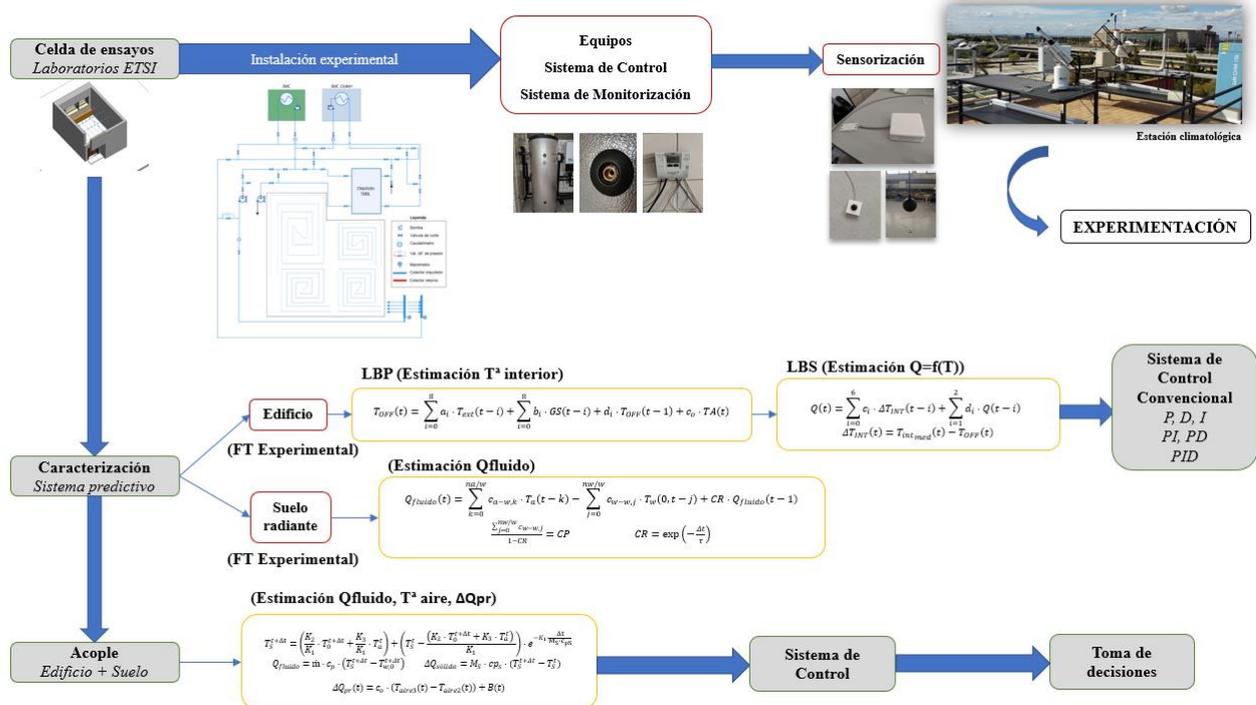


Figura 2: Esquema de metodología

1. Como base de partida, se ha contado con una **celda de ensayos**, con la que se ha realizado toda la experimentación del proyecto. Ésta se ha dispuesto de una serie de equipos (bombas de calor, equipos de climatización, tanque de almacenamiento, etc.), un sistema de control y un sistema de monitorización. Además, se ha dispuesto de un sistema de sensorización, compuesto por sensores de temperatura y caudalímetros instalación en la celda de ensayos. Por último, se ha contado con una estación climatológica, con la que se han obtenido los datos meteorológicos como temperatura exterior y radiaciones.
2. Una vez realizada la instalación de la estación climatológica, los equipos de sensorización, el sistema de control y monitorización y los equipos principales, se ha procedido a la **caracterización** inversa del entorno de estudio.

En lo que se refiere al edificio sin el funcionamiento del suelo radiante:

- a) En primer lugar, se ha realizado la caracterización de la celda de experimentación en ausencia del funcionamiento de equipos de climatización, es decir, en oscilación libre. Mediante una serie de experimentos para un día tipo, se han tomado datos de la estación meteorológica (temperatura exterior y radiaciones difusa banda y radiación directa horizontal), de la posición solar (acimut y Cenit NOAA) y, mediante los sensores interiores, una temperatura promedio del aire de la sala. Además, se han instalado unas lamas con las que se ha obtenido la radiación directa que llega a la ventana de la sala. Para ello, se ha calculado la ganancia solar de ésta en función de su geometría. Con todo esto se pueden calcular las ganancias solares. La suma total de las ganancias solares viene dada por la descomposición de las ganancias solares directas y difusas, siendo las directas un producto de la radiación incidente sobre la fachada por el factor solar de la ventana y por la suma de transmisividades directa-directa y directa-difusa. Por otro lado, la ganancia solar difusa se obtiene como un producto de la suma de radiaciones difusas del suelo, el cielo y la de obstáculos remotos, por el factor solar de la ventana y por la transmisividad difusa-difusa. Una vez calculadas las ganancias solares totales en base GMT+0, se corregirán en función de la estación, ya sea para verano (+2) y/o para invierno (+1).

Por tanto, una vez obtenidas las ganancias solares, y conociendo las temperaturas exteriores para instantes anteriores, así como la sensorización de la temperatura promedio del aire y la temperatura de los muros exteriores alrededor de la sala para dichos instantes, se podrá estimar la temperatura interior de la habitación realizando regresiones lineales en la temperatura exterior, las ganancias solares y la temperatura interior para el mismo instante. Con todo este procedimiento, se obtiene la temperatura interior de la habitación en oscilación libre, por lo que se podrá estimar, mediante la función de transferencia desarrollada, dicha temperatura para instantes posteriores. A esta función de transferencia experimental, se le denominará a lo largo de todo el proyecto como **Línea Base Primaria (LBP)**.

- b) Una vez obtenida la LBP, se va a desarrollar una segunda función de transferencia experimental, la cual se va a denominar **Línea Base Secundaria (LBS)**, que consiga estimar la temperatura del interior de la habitación con el funcionamiento de un equipo de climatización en función de la transferencia de calor.

Se entiende la LBS como la potencia de calor que se obtiene a partir de la diferencia de las temperaturas interior medida y la temperatura en oscilación libre. Se podrá estimar por tanto, el consumo energético de acondicionamiento de la sala. Mediante los instantes anteriores de la diferencia de temperaturas interior y en oscilación libre, y del calor en dichos instantes, se podrá estimar el calor en instantes posteriores. A partir de una regresión lineal en todos los instantes de la diferencia de temperaturas y el calor, se obtendrá la LBS.

- c) Tras desarrollar las funciones de transferencia experimentales denominadas como LBP y LBS, se ha implementado un **sistema de control convencional** a partir de los controladores típicos (P, D, I, PI, PD y PID) con el fin de conocer cuál de ellos responde de forma más eficaz y rápida al control de las funciones desarrolladas. En el siguiente capítulo, se detalla dicho sistema de control.

Una vez obtenida la caracterización del edificio, se ha realizado de forma análoga para el suelo radiante instalado:

- d) Por otro lado, se realizará la caracterización de un **panel radiante** instalado en la sala. Para ello, se habrán de tomar datos de temperaturas sobre los distintos embebidos de la sala estableciendo así una temperatura media superficial. Además, se obtendrán temperaturas superficiales de las paredes para poder estimar una temperatura radiante media a partir del cálculo de factores de forma obtenidos realizando algunas hipótesis y simplificaciones respecto a los coeficientes de película interiores y exteriores que se detallan en el siguiente capítulo. Una vez se tiene una temperatura media del aire y una temperatura media superficial, además de fijar un caudal del fluido que circula por el panel por facilitar el cálculo y tener como dato la temperatura de impulsión del agua, se podrá hallar el calor del fluido en función de la diferencia de temperaturas de impulsión y la temperatura media del aire. A partir de una regresión lineal en todo el periodo de simulación de la diferencia de temperaturas y el calor del fluido se podrá obtener la función de transferencia experimental. Se podrá obtener además, el término de Razón Común (siendo ésta el término de la regresión lineal que hace referencia al instante anterior del calor del fluido) y la constante de tiempo.

3. Por último, se realizará el **acople** del panel radiante con el recinto de experimentación. Para ello, se obtendrá

una función de transferencia experimental que permitirá estimar múltiples incógnitas, como la temperatura media del aire interior en el instante actual, la temperatura de retorno del agua, la temperatura del sólido y el calor del panel radiante que se transfiere al aire de la sala.

Para ello, es necesario el previo cálculo de la LBS ya que se requerirá los coeficientes de la función de transferencia para el cálculo de la temperatura media del aire en el instante actual en función de la diferencia de calor transferido al aire en el mismo instante. Además, es necesaria la caracterización del suelo para conocer la constante de tiempo obtenida a partir de la regresión lineal realizada previamente.

Con el acople del suelo radiante con el recinto, el plan será establecer un sistema de control predictivo con el cual se podrán tomar decisiones en función del confort térmico establecido por el usuario en función de la climatología y los equipos instalados en la sala.

Las ecuaciones matemáticas desarrolladas se detallarán en el siguiente capítulo.

2.3. Datos climatológicos

A partir de la estación climatológica, se han podido recoger los datos climatológicos para un día tipo. Se han tomado distintos periodos de tiempo con los que se han probado las Líneas Base.

Para la LBP se han tomados los datos desde 01/06/2021 hasta 30/09/2021:

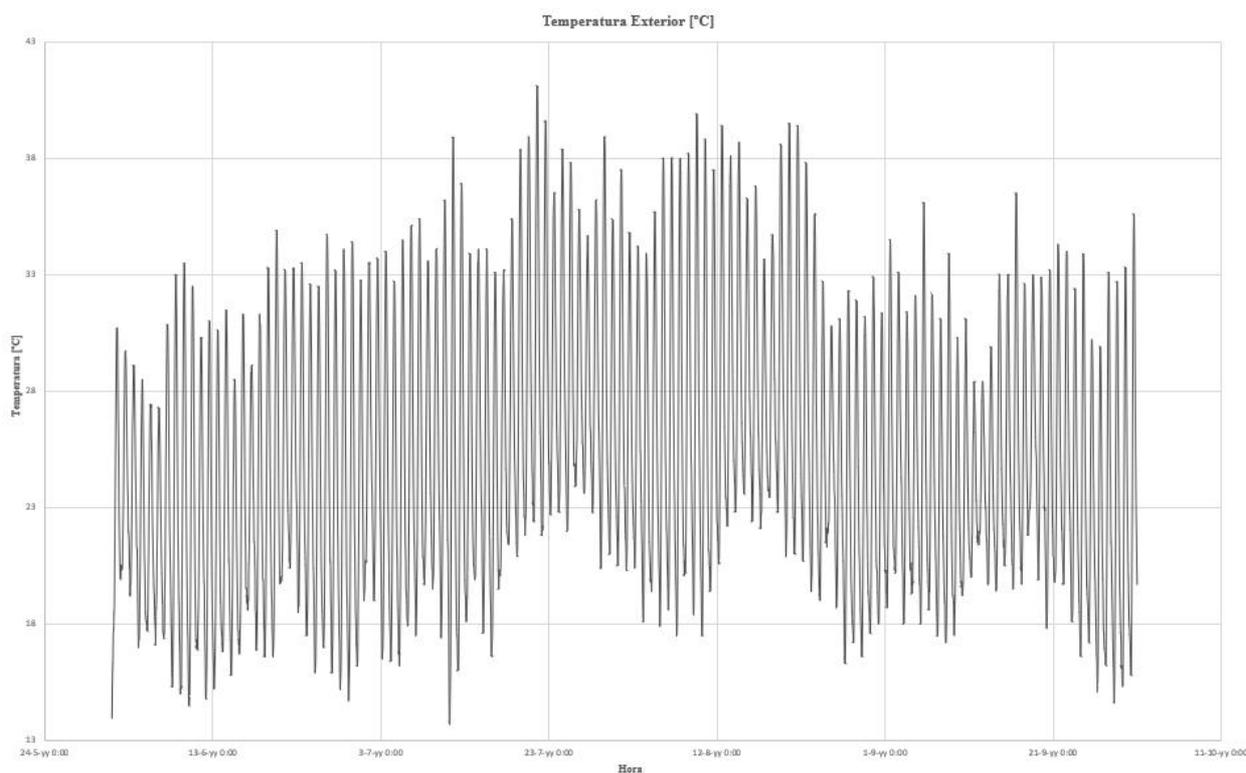


Gráfico 1: T^a exterior (LBP)

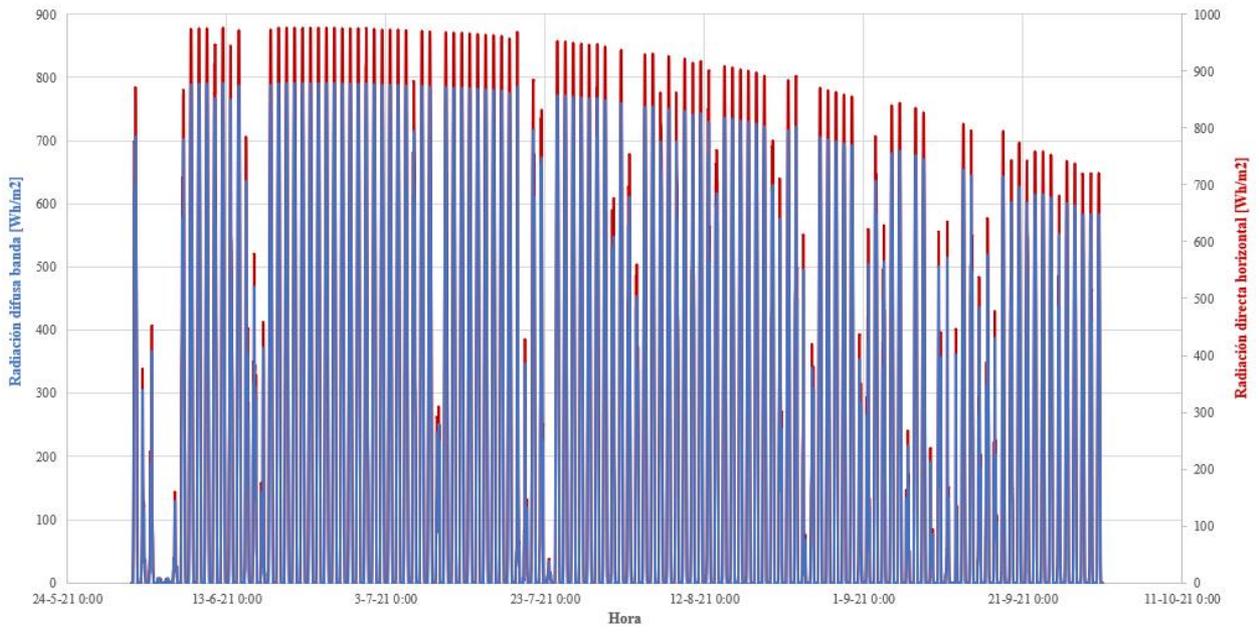


Gráfico 2: Radiaciones difusa banda y directa horizontal (LBP)

3 APLICACIÓN

En este capítulo, se va a detallar la casuística de aplicaciones en el lugar donde se van a realizar los experimentos. En primer lugar, se detallará el centro de experimentación, especificando el inventario de equipos de los que dispone y una breve explicación de su funcionamiento. A continuación, se detallarán los escenarios del edificio preexistente sin/con aire acondicionado, exponiendo el modelo de caracterización predictivo basado en el desarrollo de líneas base, la instalación de suelo radiante en el edificio y el acople de ambos. Por último, se realizará una revisión de formas de control de suelos radiantes en edificios.

La ventaja del sistema desarrollado a partir de líneas base es que no se necesitan largos periodos de tiempo para su simulación, se hace una predicción respecto a los otros sistemas en un corto periodo de tiempo.

3.1. Experimental facility

Se procede a detallar las características principales del centro experimental del cual ha hecho posible la realización del presente proyecto.

El centro experimental está localizado en uno de los Laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (perteneciente a la Universidad de Sevilla – Grupo Termotecnia).



Figura 3. Localización laboratorio.

A continuación, se muestran las dimensiones físicas del laboratorio:

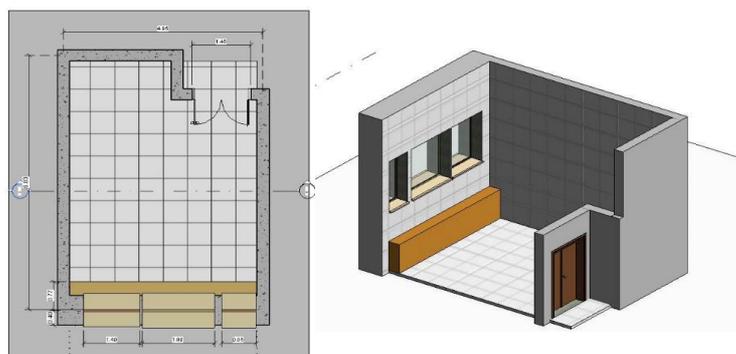


Figura 4. Dimensiones físicas laboratorio.

Para la realización de los experimentos desarrollados en el laboratorio, se han instalado los siguientes equipos:

- Bomba de calor aire/agua (marca Daikin).
- Bomba de calor aire/agua (marca Gree).
- Bomba de calor aire/aire.
- Depósito de almacenamiento (volumen de 500 litros).
- Suelo radiante.
- Sistema de Monitorización.
- Sistema de Control.

A continuación, se muestra un esquema de la instalación con los equipos conectados:

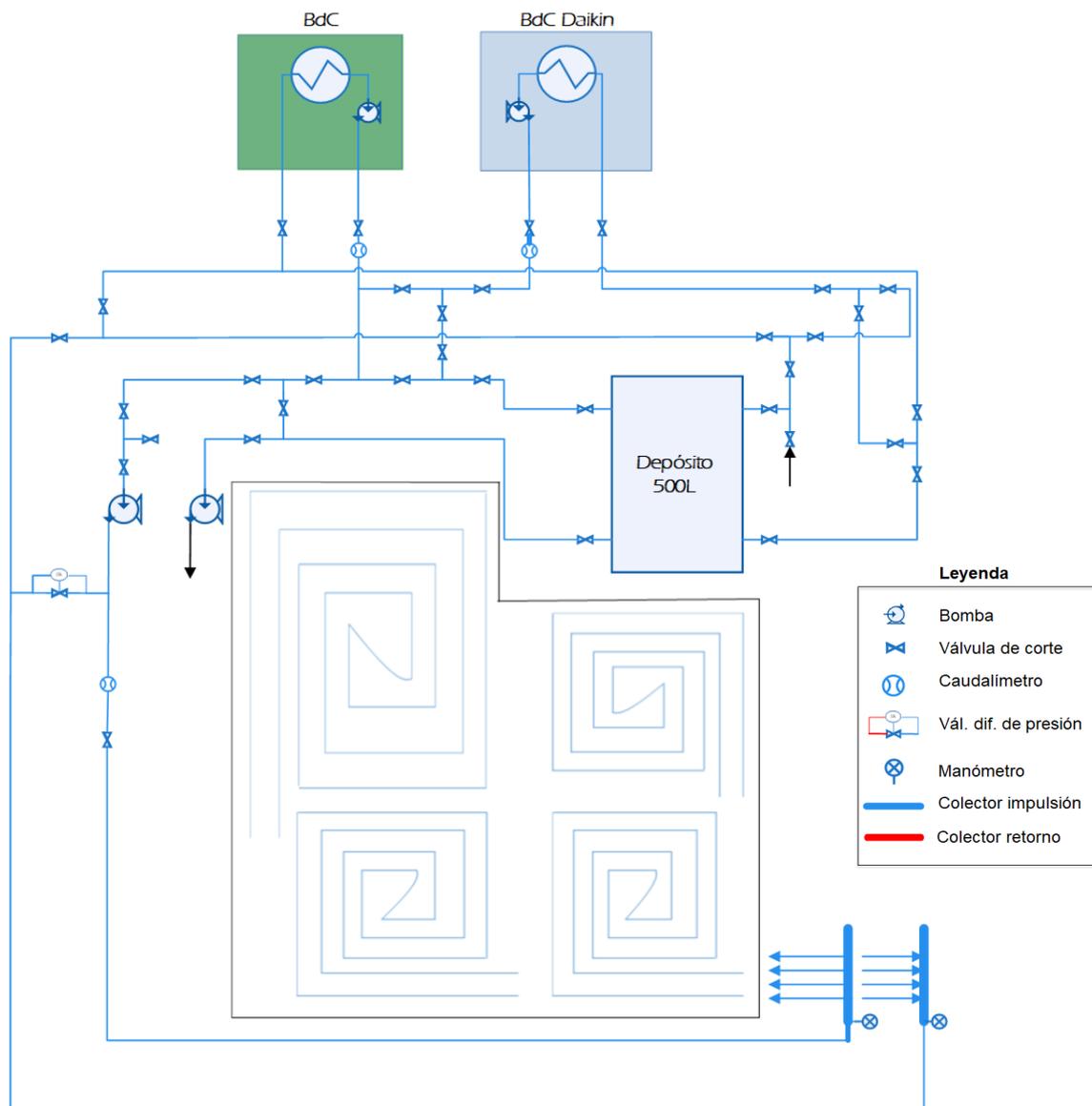


Figura 5. Esquema de la instalación completa.

Los equipos anteriormente nombrados, han sido suministrados al Grupo de Termotecnia de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla por la empresa UPONOR, con el fin de realizar un estudio del sistema de control en su producto de suelo radiante.

La instalación del sistema de monitoreo y sensorización ha sido realizada por el Grupo de Termotecnia, así como

el desarrollo de un modelo simplificado del suelo radiante y una serie de experimentos que se explicarán posteriormente.

Se pasa a describir cada uno de los equipos.

▪ **Bomba de calor aire/agua (DAIKIN).**

Se trata de una bomba de calor aire/agua de la marca Daikin (modelo Altherma, ERGA04EAV3 + EHBX04EA6V). Las bombas de calor son equipos que, utilizando un gas refrigerante en un ciclo termodinámico cerrado, transfieren calor entre dos focos a diferente nivel térmico, haciendo que dicho calor fluya de una temperatura más baja a otra más alta. Gracias a las bombas de calor, se puede obtener calefacción y refrigeración. A continuación, se muestra el datasheet del equipo:

Datos de eficiencia		EHBX + ERGA			04E6V + 04EV			
Potencia Cal.	Nominal					kW	4,30 (1) / 4,60 (2)	
Potencia entrada	Calefacción	Nominal				kW	0,850 (1) / 1,26 (2)	
Potencia Ref.	Nominal					kW	4,86 (1) / 4,52 (2)	
Potencia entrada	Refrigeración	Nominal				kW	0,810 (1) / 1,36 (2)	
COP							5,10 (1) / 3,65 (2)	
EER							5,98 (1) / 3,32 (2)	
Calefacción del espacio	Clima medio salida de agua (55°C)	General	SCOP				3,29	
			Eficiencia estacional del espacio en calefacción	%				129
	Clima medio salida de agua (35°C)	General	SCOP					4,54
			Eficiencia estacional del espacio en calefacción	%				179
			Clase de eficiencia				A++	
			Clase de eficiencia				A+++	
Unidad Interior		EHBX						
Cubierta		Color			Blanco y Negro			
		Material			Resina, chapa metálica			
Dimensiones	Unidad	Altura x Espesor x Profundidad			mm	840 x 440 x 390		
Peso		Unidad			kg	42		
		Unidad			kg	42		
Rango de operación	Calefacción	Lado agua	Mín. - Máx.	°C	15-65			
	Agua Caliente Doméstica	Lado agua	Mín. - Máx.	°C	25-75			
Nivel del sonido (Potencia)		Nominal			dBA	42		
Nivel del sonido (Presión)		Nominal			dBA	28		
Unidad Exterior		ERGA						
Dimensiones	Unidad	Altura x Espesor x Profundidad			mm	740 x 884 x 388		
Peso	Unidad				kg	58,5		
Compreso	Cantidad					1		
	Tipo					Compresor oscilante hermético		
Rango de operación	Refrigeración	Lado agua	Mín. - Máx.	°CDB	10(-)43			
	Agua Caliente Doméstica	Lado agua	Mín. - Máx.	°CDB	(-)25-35			
Refrigerante	Tipo					R-32		
	GWP					675		
	Carga				kg	1,5		
	Carga				TCO2Eq	1,01		
	Control					Válvula de expansión		
Nivel del sonido (Potencia)	Calefacción	Nominal			dBA	58		
	Refrigeración	Nominal			dBA	61		
Nivel del sonido (Presión)	Calefacción	Nominal			dBA	44		
	Refrigeración	Nominal			dBA	48		
Apoyo potencia	Nombre/Fase/Frecuencia/Voltaje			Hz/V	V3/1N-/50/230			
Intensidad	Fusibles recomendados			A	25			

Tabla 1. Datasheet BdC Daikin.

(1) Refrigeración Ta 35°C – LWE 18°C (DT = 5°C); Calefacción Ta DB/WB 7°C/6°C – LWC 35°C (DT = 5°C).

(2) Refrigeración Ta 35°C – LWE 7°C (DT = 5°C); Calefacción Ta DB/WB 7°C/6°C – LWC 45°C (DT = 5°C).

El fabricante ha proporcionado la curva de funcionamiento de la bomba de calor operando al 100% de carga. A continuación, se muestran dichas curvas para el rango de temperaturas exteriores y de temperaturas de impulsión con las que se ha realizado todo el proceso experimental:

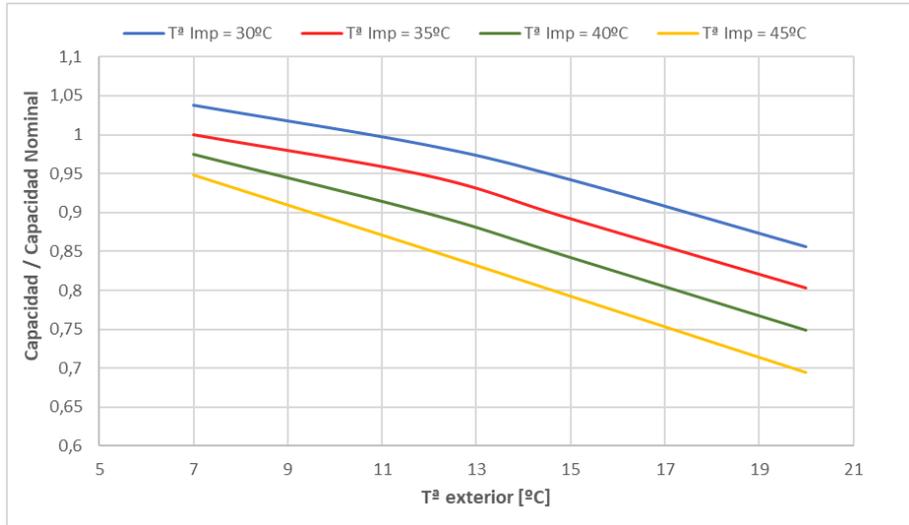


Figura 6. Curvas BdC Daikin (30°C - 45°C).

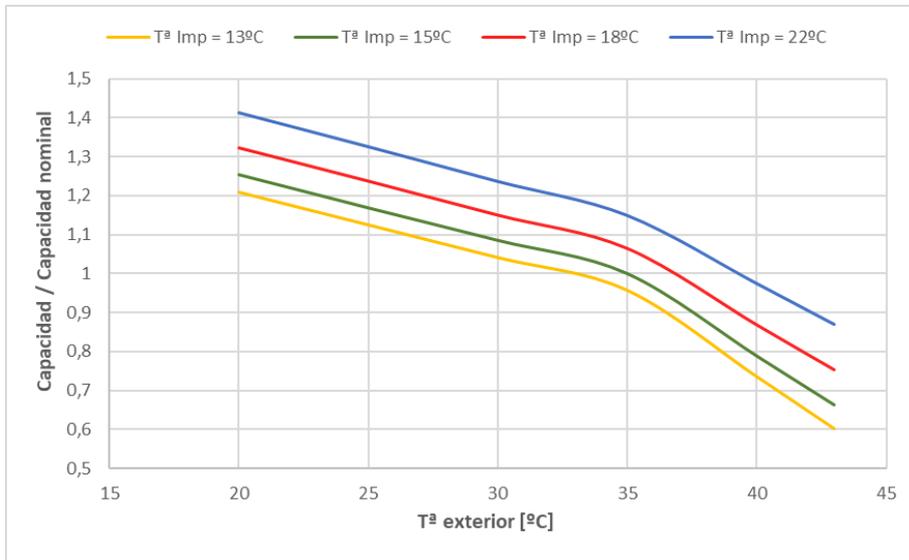


Figura 7. Curvas BdC Daikin (13°C - 22°C).

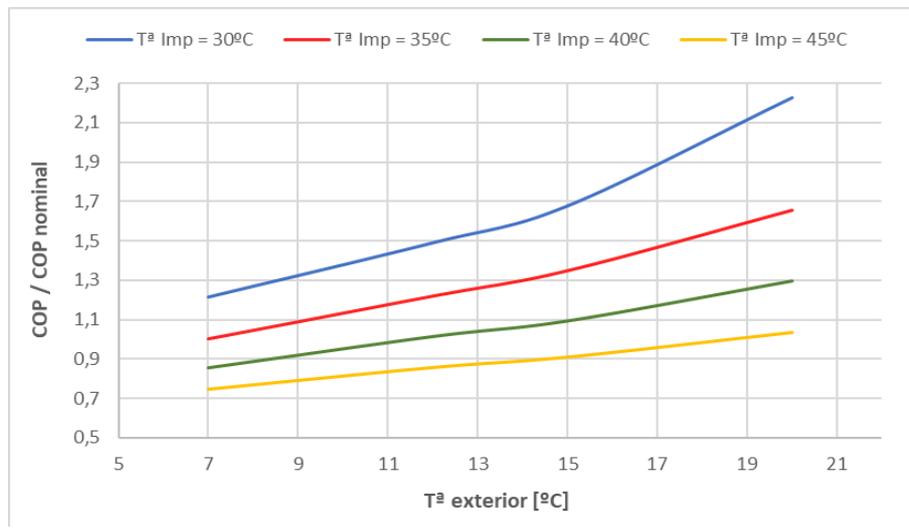


Figura 8. Curvas COP Daikin (30°C - 45°C).

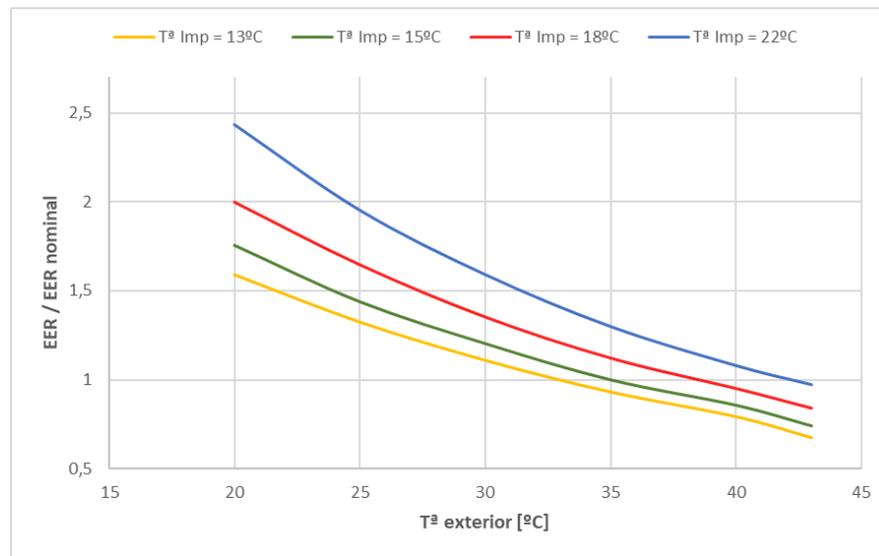


Figura 9. Curvas EER Daikin (13°C - 22°C).

- **Bomba de calor aire/agua (GREE).**

Se trata de una bomba de calor aire/agua de la marca GREE (modelo Versátil III, GRS-CQ4.0Pd / NhH-E). Se muestra el datasheet del equipo (Tabla 2).

Al igual que en la bomba de Daikin, el fabricante ha proporcionado la curva de funcionamiento de la bomba de calor operando al 100% de carga. Se muestran dichas curvas para el rango de temperaturas exteriores y de temperaturas de impulsión con las que se ha realizado todo el proceso experimental.

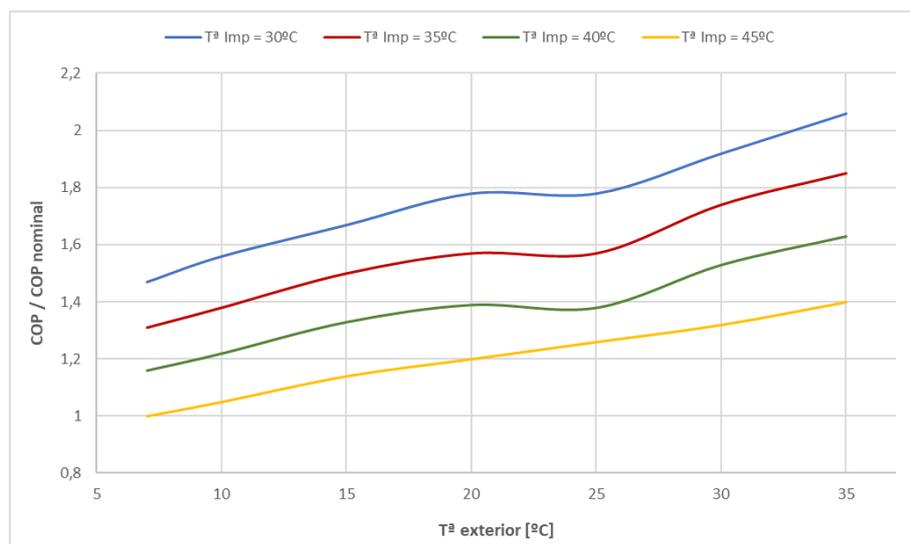


Figura 10. Curvas COP Gree (30°C - 45°C).

Modelo		GRS-CQ4.0Pd /NhH-E(I)	
Apoyo potencia		V/Ph/Hz	230V-50Hz
Potencia nominal		W	100
Tª agua salida	Refrigeración (1)	°C	18
	Refrigeración (2)	°C	7
	Calefacción (1)	°C	35
	Calefacción (2)	°C	45
Tipo		-	Inversor
Bomba	Nº de velocidad	-	10
	Potencia entrada	W	75
	Límite caudal de agua	LPM	12
Operación		-	Automático
Calentador eléctrico	Pasos	-	2
	Capacidad	kW	3
	Combinación	kW	1.5+1.5
	Potencia entrada	V/Ph/Hz	230V-50Hz
Nivel sonido presión		dB(A)	29
Tubería de conexión	Gas	inch(mm)	12,7
	Líquido	inch(mm)	6,35
Dimensiones (W x D x H)	Equipo	mm	860 x 460 x 318
	Paquete	mm	1133 x 568 x 390
Peso neto / Peso bruto		kg	62/71
Carga cuantificada	40'GP	Equipo	240
	40'HQ	Equipo	240
Modelo		GRS-CQ4.0Pd /NhH-E(O)	
Potencia apoyo		V/Ph/Hz	230V-50Hz
Capacidad (1)	Refrigeración (3)	kW	3,8
	Calefacción (4)	kW	4
Potencia entrada	Refrigeración (3)	kW	0,82
	Calefacción (4)	kW	0,78
EER / COP (1)		W/W	4.63/5.13
Capacidad (2)	Refrigeración (5)	kW	3,15
	Calefacción (6)	kW	4
Potencia entrada	Refrigeración (5)	kW	0,92
	Calefacción (6)	kW	1,02
EER / COP (2)		W/W	3.42/3.92
Volumen de carga refrigerante		kg	1
Tª agua sanitaria		°C	40-80
Nivel sonido presión	Refrigeración	dB(A)	52
	Calefacción	dB(A)	52
Tubería de conexión	Gas	inch(mm)	12,7
	Líquido	inch(mm)	6,35
Dimensiones (W x D x H)	Equipo	mm	975 x 396 x 702
	Paquete	mm	1028 x 458 x 830
Peso neto / Peso bruto		kg	55/65
Carga cuantificada	40'GP	Equipo	114
	40'HQ	Equipo	171

Tabla 2. Datasheet BdC Gree.

- (1) Capacidades y potencias de entrada basadas en las siguientes condiciones:
- o Condiciones de refrigeración: Tª salida aire (35°C DB/-WB); Tª entrada agua (23°C); Tª salida agua (18°C).
 - o Condiciones de calefacción: Tª salida aire (7°C DB/6°C WB); Tª entrada agua (30°C); Tª salida agua (35°C); Longitud tubería (5m).
- (2) Capacidades y potencias de entrada basadas en las siguientes condiciones:
- o Condiciones de refrigeración: Tª salida aire (35°C DB/-WB); Tª entrada agua (12°C); Tª salida agua (7°C).
 - o Condiciones de calefacción: Tª salida aire (7°C DB/6°C WB); Tª entrada agua (40°C); Tª salida agua (45°C); Longitud tubería (5m).
- (3) Para suelo refrigerante.
- (4) Para suelo calefactante.
- (5) Para unidad de fan-coil.
- (6) Para fan-coil o radiador.

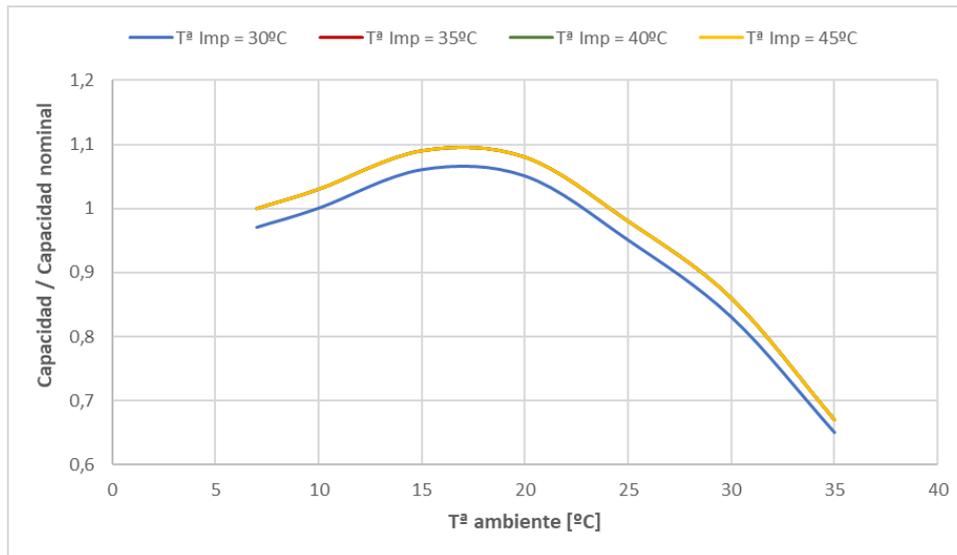


Figura 11. Curvas BdC Gree (30°C - 45°C).

En la Figura 10 se observa que las curvas para las temperaturas de impulsión iguales a 35°C y 40°C coinciden con la curva a la temperatura de impulsión de 45°C.

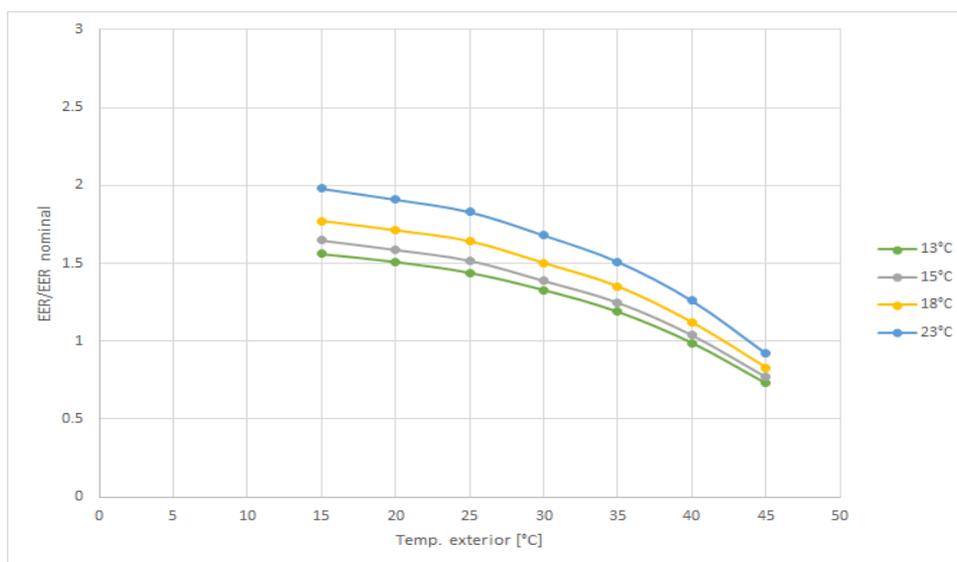


Figura 12. Curvas EER Gree (13°C - 22°C).

▪ Sensorización.

Se ha dispuesto de un sistema de sensorización para la toma de datos en la sala de estudio de las siguientes condiciones:

- Condiciones exteriores. Los datos de condiciones exteriores se han tomado a partir de la estación climática instalada en la cubierta del edificio del laboratorio (Figura 12). Con ésta, se han recogido datos de seguidor solar, radiación en distintos espectros ('sky radiometer'), altura de la base de las nubes (nefobasímetro, 'ceilometer'), radiación directa normal, radiación global horizontal, radiación global inclinada y una captura de cielo entero ('sky camera').



Figura 13. Estación meteorológica.

- Temperatura del aire. La temperatura del aire en el interior de la sala de estudio se ha medido a partir de 5 sensores PT100 colgados a distintas alturas y distribuidos por el espacio (Figura 13).

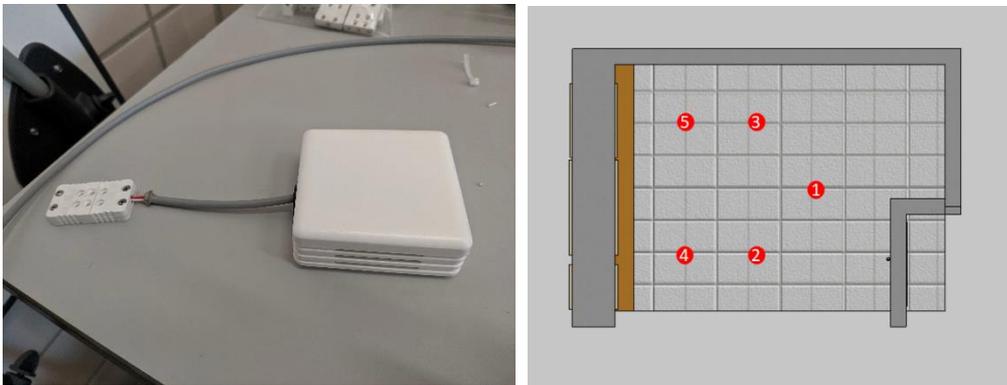


Figura 14. Sensor T^a aire y localización en sala.

- Temperaturas superficiales. Se ha medido la temperatura superficial en distintos puntos de la sala, una vez han sido calibrados los sensores en un horno de calibración (Figura 14).

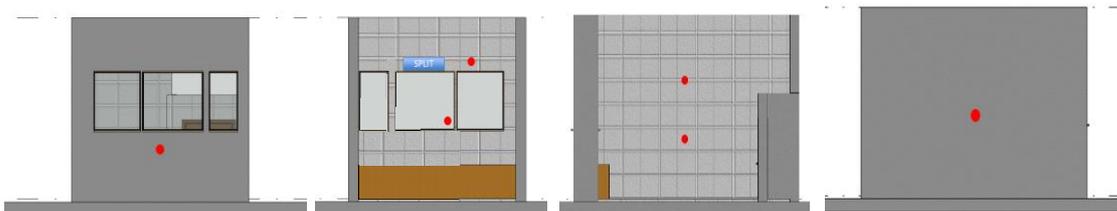


Figura 15. (1) Fachada exterior (1,5 m del suelo) / (2) Fachada interior (1,5 y 3 m) / (3) Partición interior (int.) (1,5 y 3 m) / (4) Partición interior (ext.) (pto. medio).

- Monitorización radiante. Se ha dispuesto sensores de tipo globo y semiesfera para la medición complementaria de la temperatura radiante media (PT100). El sensor de tipo globo se ha colgado desde el techo en la zona central de la sala y el sensor de tipo semiesfera en la zona central en el suelo (Figura 15).

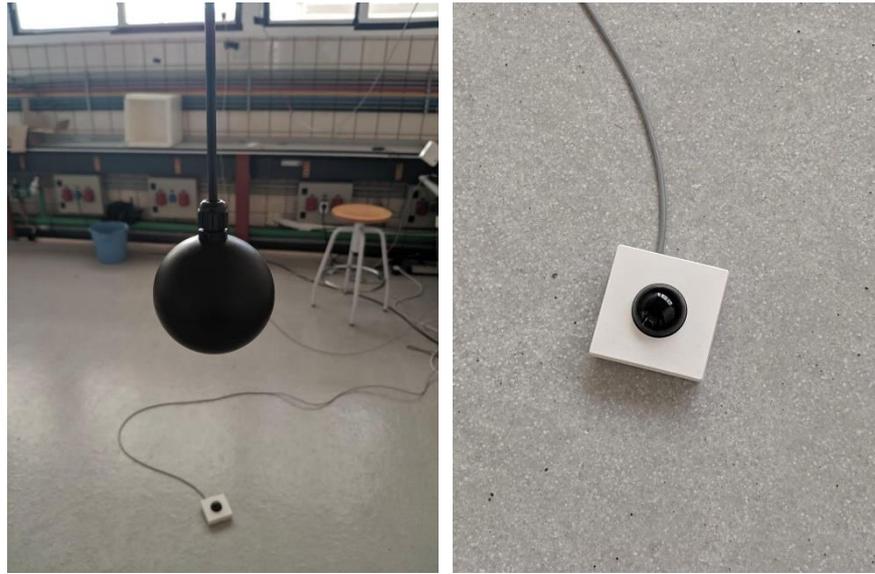


Figura 16. Sensor globo | Sensor semiesfera.

- Monitorización sistema de climatización. Se han recurrido a sensores de termopozos y caudalímetros para monitorizar las temperaturas y caudales en el sistema de climatización. En el depósito de almacenamiento, se han instalado 2 termopozos para medir la temperatura del depósito, localizados a un tercio y dos tercios de altura del depósito. Además, se han instalado en el mismo 4 termopozos adicionales para medir todas las entradas y salidas. También se han colocados 3 termopozos adicionales en las impulsiones de las bombas de calor y en el retorno. En cuanto a la medida de caudales, se han instalado 3 caudalímetros, uno para cada bomba de calor, y la última con el fin de contabilizar el caudal que circula por el suelo radiante (Figura 16).

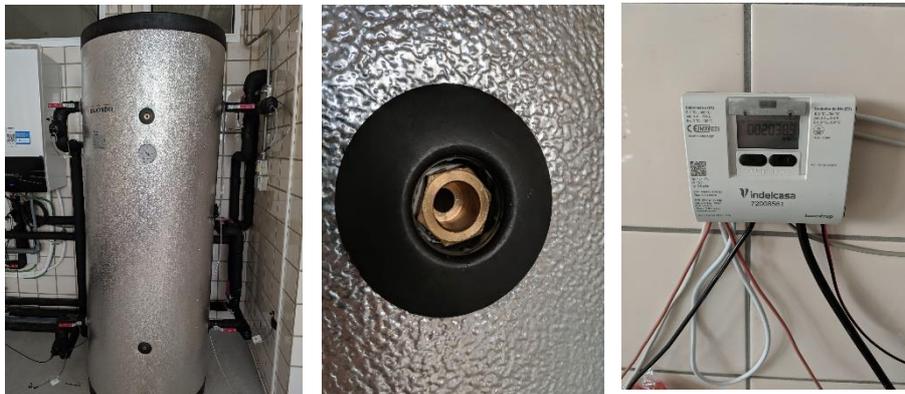


Figura 17. Sensores en depósito | Sensores en impulsión y retorno de BdC | Caudalímetros.

- Monitorización en panel radiante. En cuanto a la sensorización del suelo radiante, se han instalado 5 termopares embebidos en el mortero, uno por cada circuito más uno adicional. Además, se han instalado 5 sensores colocados sobre la superficie del mortero en el mismo punto que los embebidos (Figura 17 y Figura 18).



Figura 18. Monitorización en panel radiante.

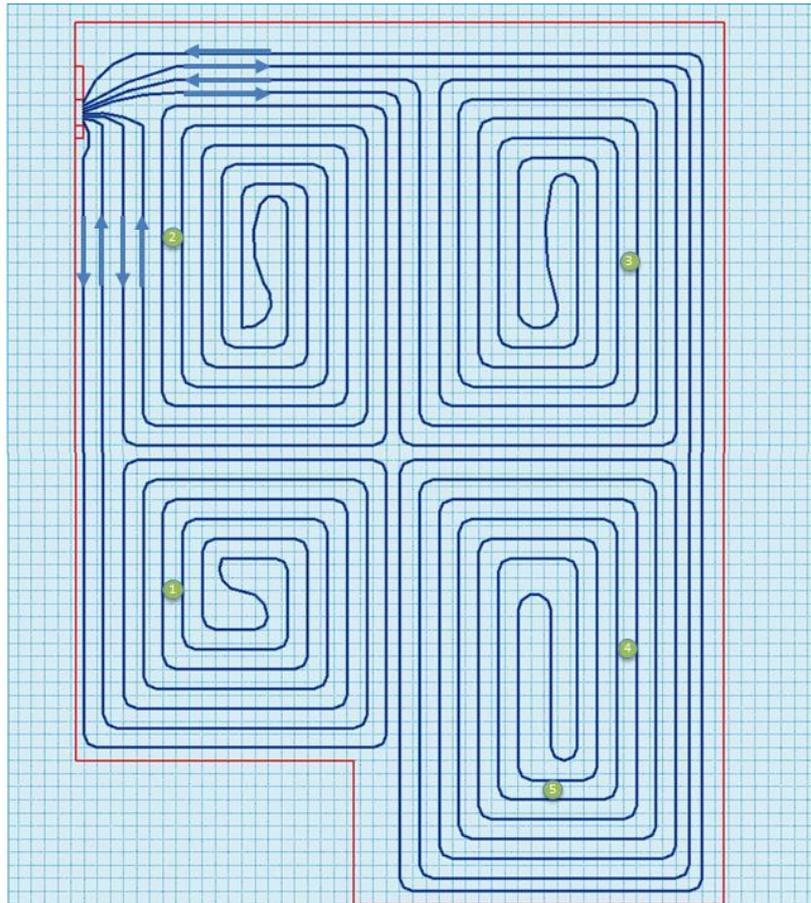


Figura 19. Sensores en panel radiante.

- **Bomba de calor aire/aire.** La bomba de calor aire/aire (tipo split) se encontraba previamente instalada en la sala de los laboratorios antes de la realización de los experimentos.

Una vez instalados los sensores y sistemas de medida, se han realizado una serie de experimentos tanto para refrigeración como para calefacción para cada una de las bombas de calor.

Para el régimen de refrigeración, se llevó a cabo un primer ensayo con las dos bombas de calor con el fin de analizar los diferentes periodos de aprendizaje del control suministrados por UPONOR, siendo el control reseteado para un funcionamiento de 24 horas. Para ambas bombas de calor el ensayo realizado muestra tres periodos diferenciales de funcionamiento: arranque, periodo de aproximación a la consigna operativa y estabilización del sistema. Se llega, para ambas opciones, a que presentan un ajuste a la consigna operativa óptimo, trabajando bajo el sistema Smatrix. En el caso de la bomba de calor de la marca Gree, el factor de carga

parcial es mayor que en el caso que la bomba de Daikin; se llega a la conclusión de que ésta última está sobredimensionada para el espacio de trabajo. Debido a dicho sobredimensionamiento, el número de arranques de la bomba de Daikin es superior al de la bomba de Gree. Por otro lado, los EER medidos en la bomba de Daikin son mejores que la bomba de Gree. A modo de conclusión, se llega a que la bomba de Gree presenta un funcionamiento estable con poca variación de caudal, mientras que la bomba de Daikin es impredecible, domina sus algoritmos de control interno. En el caso de Daikin, ésta presenta un funcionamiento complejo cuyo caudal es variado continuamente, independiente del sistema de gestión de UPONOR.

Para el régimen de calefacción, se han realizado un total de 3 ensayos. El primero de ellos se realizó, con objeto de analizar los diferentes periodos de aprendizaje del control de UPONOR, reseteando el control cuando se efectúa el cambio de bomba. En el segundo de los ensayos, se han evaluado las prestaciones de los equipos una vez el control opera de forma estable. En el último ensayo, se ha evaluado el sistema de control analógico. Se llegan a las siguientes conclusiones:

- El efecto de la intermitencia provoca que los valores de COP medidos estén más lejos que el COP dado por cada fabricante a plena carga. Se puede decir que el sistema SMATRIX disminuye el rendimiento de las dos máquinas.
- A la vista de los resultados obtenidos, parece que el efecto de la intermitencia disminuye en mayor medida el rendimiento de la bomba de calor Gree que la bomba de Daikin.
- Con el control analógico, el número de encendidos del compresor para un periodo concreto es mucho menor que con el sistema SMATRIX. Esto puede traducirse en un aumento de la vida útil del compresor.
- Cuando se trabaja en modo analógico, se presenta un mejor rendimiento para la bomba de calor Gree, frente a la curva a plena carga facilitada por el fabricante.

3.2. Caracterización del edificio

En este punto, se procede a detallar la caracterización de la sala de los laboratorios donde se han realizado los experimentos, en ausencia de la bomba de calor aire/aire (*split*) y las bombas de calor aire/agua.

La caracterización inversa del edificio se ha llevado a cabo a partir de un método de cálculo estimado basado en una línea base mediante el uso de los sensores instalados en el centro de estudio. Dicha línea base se ha obtenido mediante funciones de transferencia. El sistema de predicción a través de líneas base presenta una gran versatilidad, ya que se pueden escoger los parámetros de ratios de extracción de calor máximos y mínimos, además del término *throttling* por lo que se puede establecer un comportamiento descriptivo para los distintos equipos del mercado. Además, presentan una ventaja principal respecto a los sistemas de predicción basados en redes neuronales, al poder realizar modificaciones de las variables que forman parte del sistema, al contrario de las redes neuronales en las que se requieren una gran cantidad de ecuaciones para poder definir el sistema.

La primera línea base, denominada Línea Base Primaria (LBP), se basa en el cálculo de la temperatura interior del edificio en ausencia de equipos y de ocupación interior (oscilación libre). Dicha temperatura se ha denominado temperatura en '*Free-Floting*'.

El cálculo de dicha temperatura en oscilación libre en un instante determinado se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$T_{OFF}(t) = \sum_{i=0}^8 a_i \cdot T_{ext}(t-i) + \sum_{i=0}^8 b_i \cdot GS(t-i) + d_i \cdot T_{OFF}(t-1) + c_o \cdot TA(t)$$

El primer término, hace referencia a la sumatoria del producto de una constante en un instante determinado (a_i) por la temperatura exterior al edificio de estudio en el instante anterior al que se quiere obtener la temperatura interior ($T_{ext}(t-i)$).

El segundo término se base en la sumatoria del producto de una constante en un instante determinado (b_i) por las ganancias solares en el instante anterior al que se quiere obtener la temperatura interior ($GS(t-i)$). Para la

determinación de las ganancias solares sobre el espacio a través de la ventana, se ha realizado un modelo simplificado con el que se pueden conocer dichas ganancias a partir de la descomposición de la radiación en directa y difusa, la posición solar y la colocación de las lamas.

El tercer término se corresponde al producto de un coeficiente en el instante anterior al que se pretende medir (d_i) por la temperatura interior que se quiere obtener en el instante anterior ($T_{OFF}(t - 1)$).

El último término de la expresión se corresponde a las temperaturas de los muros que se encuentran alrededor del edificio ($TA(t)$), por una constante fija (c_o). El término de la temperatura se supondrá constante en la realización de las pruebas y simulaciones que se van a realizar en el presente proyecto, para una temperatura de muros de consigna en verano de 25°C, y una temperatura de consigna en invierno igual a 21°C.

Cada uno de los coeficientes independientes en la expresión, se han obtenido a partir de regresiones lineales.

A continuación, se muestra la temperatura interior estimada (LBP), junto con la temperatura exterior para un periodo de tiempo concreto (1/06/2021 – 30/09/2021):

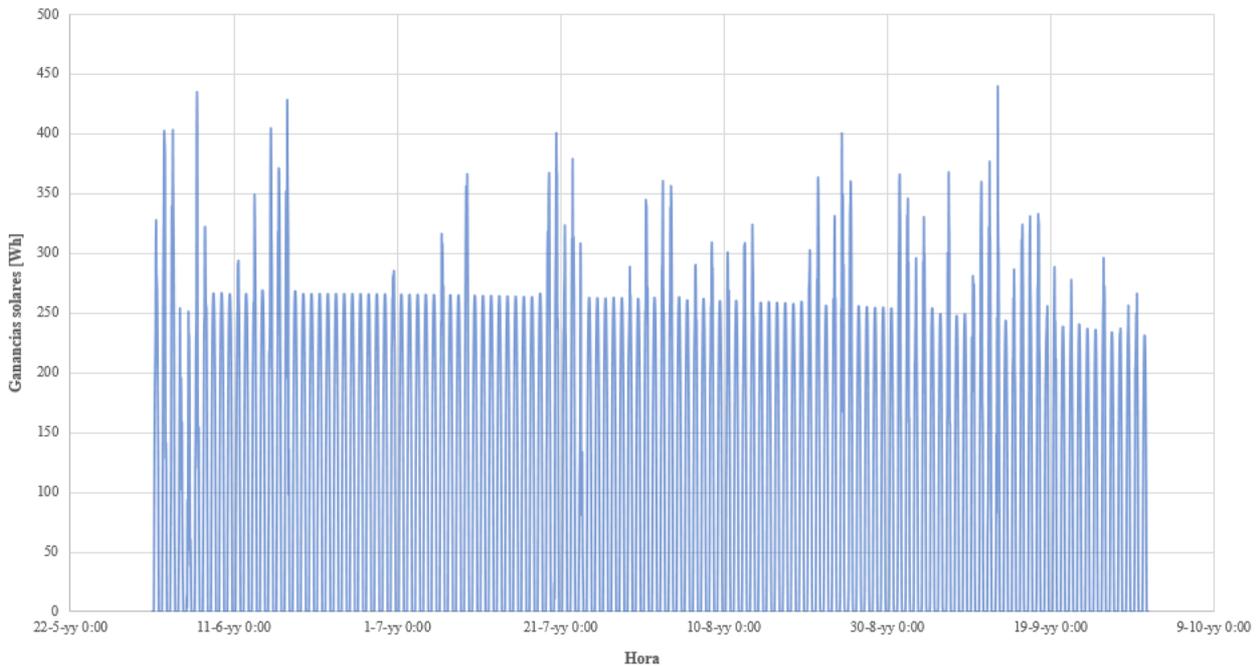


Figura 20: Ganancias solares [Wh]

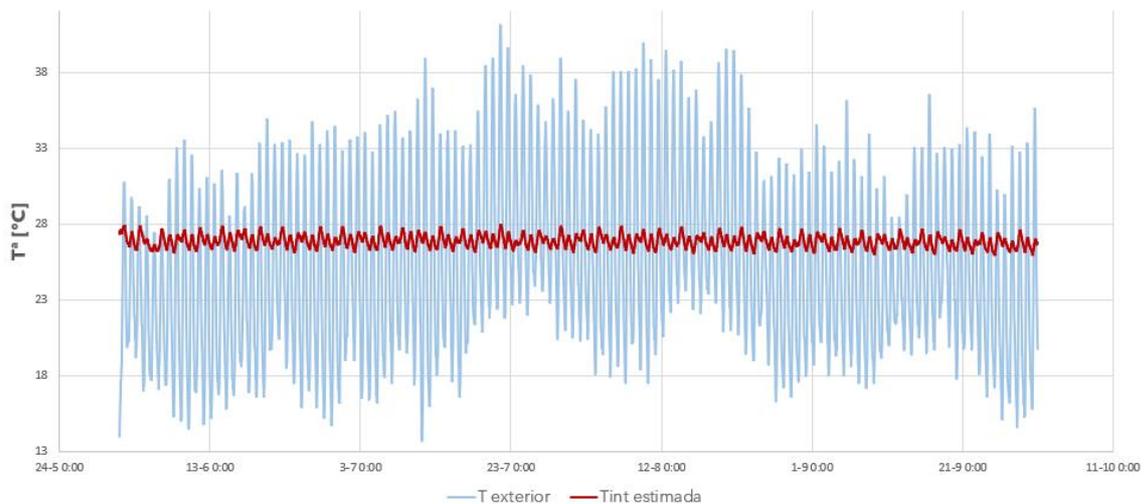


Figura 21. LBP (01/06/2021 - 30/09/2021)

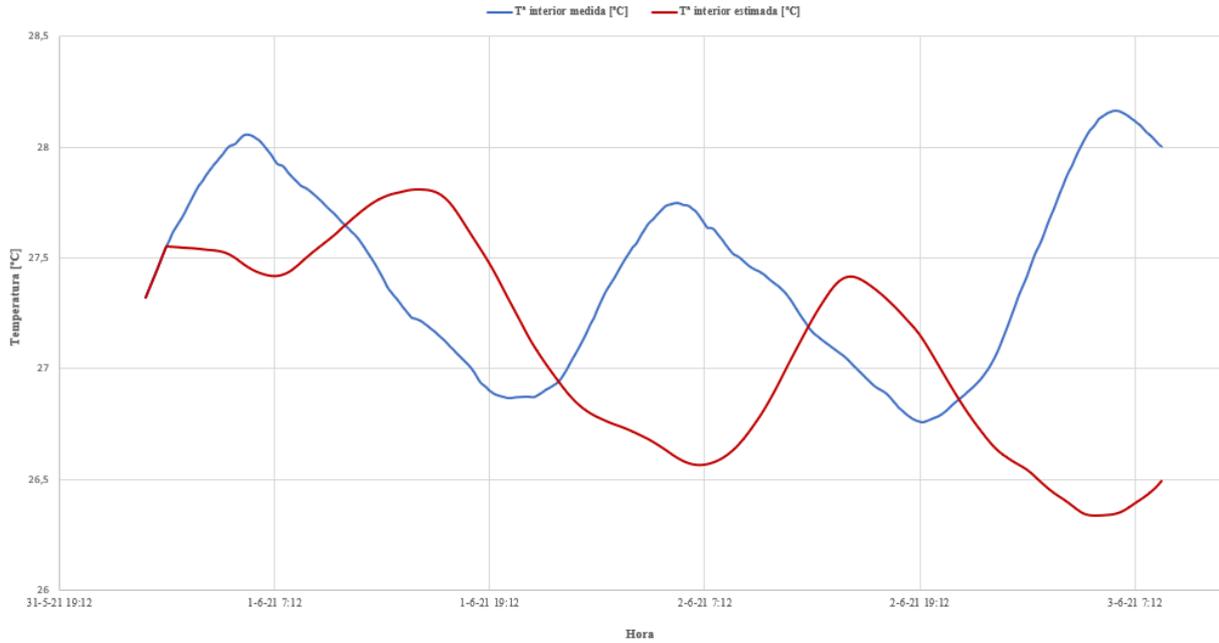


Figura 22: Temperatura interior medida VS. estimada

Se puede observar en la Figura 22, como la temperatura interior estimada se aproxima con cierto retraso a la temperatura interior medida con la función de transferencia experimental desarrollada.

3.3. Caracterización del edificio + Split

Al igual que para la caracterización del edificio, se ha implementado otra línea base con el fin de caracterizar el edificio con el funcionamiento del aire acondicionado instalado (split). Dicha línea también se ha generado a partir de una función de transferencia.

La línea base implementada, denominada como Línea Base Secundaria (LBS), se entiende como la potencia de calefacción que origina la diferencia entre la temperatura interior medida y la temperatura interior con el equipo parado, con la cual se puede llegar a hacer una predicción del consumo energético de acondicionamiento.

El cálculo de la potencia se puede obtener mediante las siguientes expresiones:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^6 c_i \cdot \Delta T_{INT}(t-i) + \sum_{i=1}^2 d_i \cdot Q(t-i)$$

$$\Delta T_{INT}(t) = T_{int_{med}}(t) - T_{OFF}(t)$$

En la primera expresión, el primer término hace referencia a la sumatoria del producto de un coeficiente para un instante determinado (c_i) por la diferencia de temperaturas interiores en el instante anterior al que se quiere obtener ($\Delta T_{INT}(t-i)$).

Por otro lado, el segundo término de la primera expresión se corresponde a la sumatoria desde el instante actual hasta el siguiente, del producto de un coeficiente para un instante determinado (d_i) por la potencia en el instante anterior ($Q(t-i)$).

La segunda expresión, muestra el cálculo de la diferencia de temperaturas para un instante determinado ($\Delta T_{INT}(t)$), como la temperatura interior medida para el mismo instante ($T_{int_{med}}(t)$) menos la temperatura interior obtenida en la LBP en ausencia de fuentes internas para el mismo instante ($T_{OFF}(t)$).

A continuación, se muestra la LBS para un periodo de tiempo concreto en el que se relaciona la temperatura interior del edificio junto con el calor en función del tiempo:

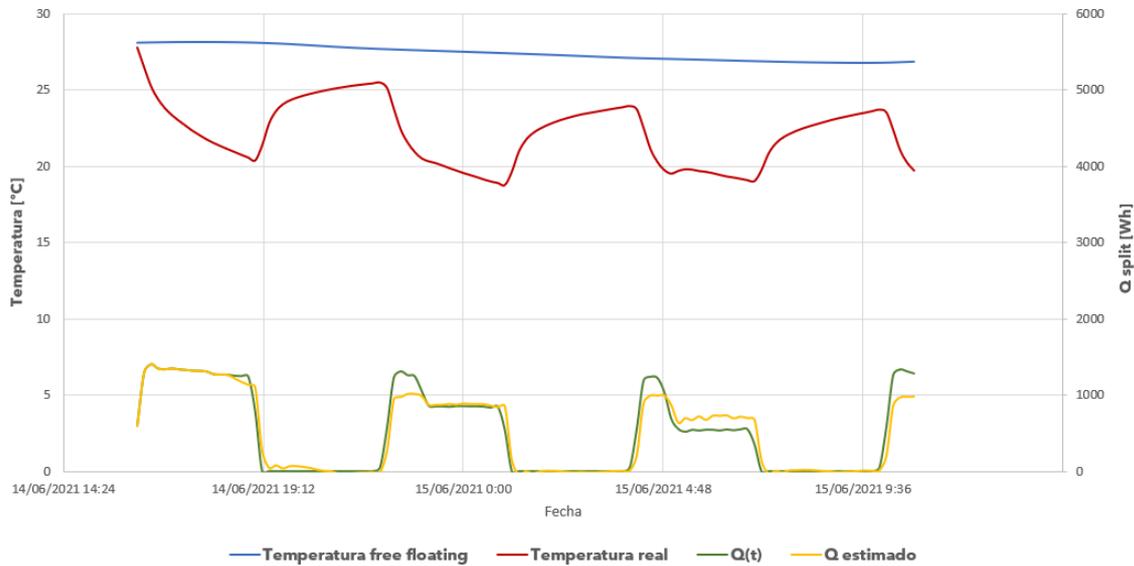


Figura 23. LBS.

Se observa cómo, en la temperatura real (línea roja) el split se apaga y enciende en periodos de tiempo concreto, descendiendo la temperatura interior de la sala. Se muestra también la temperatura interior del edificio en *free-floating*, es decir, sin el funcionamiento del split durante ese periodo de tiempo. Además, la producción estimada (línea amarilla) se aproxima de forma más o menos ajustada a la producción real dependiente del tiempo (línea verde).

Una vez definidas las dos líneas base, se tiene caracterizado el edificio completo. A partir de esto, se han desarrollado, con los resultados obtenidos, la implementación de controladores con el fin de llegar a una temperatura de consigna deseada.

Para la realización de la simulación, se ha basado el método según un modelo desarrollado en el *Handbook* de ASHRAE de 1997. Dicho modelo se basa en la estimación de la carga de refrigeración dinámica a lo largo de un periodo prolongado, en el que se tiene en cuenta cualquier pérdida que se produzca en el entorno a partir de la temperatura de una habitación. Este modelo también es fundamental para la predicción de oscilaciones de temperatura en el espacio y la capacidad de los equipos de refrigeración para extraer el calor cuando funcionan en un edificio con ciclos de desconexión prolongados. La carga de refrigeración sirve como dato de partida para estimar la temperatura del ambiente resultante y la tasa de extracción de calor con un tipo y tamaño de unidad de refrigeración concreto, o un conjunto de condiciones de funcionamiento. Las características de la unidad de refrigeración se basan en una función de transferencia de air espacial de la sala que relaciona la temperatura de aire espacial con la tasa de extracción de calor.

El desarrollo del modelo anteriormente comentado se ha adaptado a las dos líneas base desarrolladas con el fin de estimar la temperatura interior resultante a partir de una función de transferencia teniendo en cuenta instantes anteriores a los de la obtención de dicha temperatura. Este modelo se ha desarrollado con las siguientes expresiones:

$$S = \frac{(E_{rmax} - E_{rmin})}{Throttling}$$

Donde:

- S : es un parámetro que determina el rendimiento del equipo de refrigeración [W/K].
- E_{rmax}, E_{rmin} : ratios de extracción de calor máximo y mínimo [W].

- *Throttling*: rango de regulación [K]. Es la cantidad de carga en la variable del proceso que es necesaria para que la salida del controlador se cargue de 0 a 100%.

$$W_0 = \frac{Er_{max} + Er_{min}}{2} - S \cdot T_{int_{con}}$$

Siendo:

- W_0 : es el valor que tendría Er_{θ} si la relación rectilínea entre ésta y la temperatura del aire en el espacio en el instante Θ se mantuviera en el instante inicial igual a 0. Esta intercepción depende de la temperatura de consigna del sistema de regulación que puede tomarse como la media de la temperatura del rango de regulación.
- $T_{int_{con}}$: temperatura interior de consigna.

Se calculan los parámetros K_1 , K_2 y K_3 en función de las regresiones lineales realizadas a las líneas base por las temperaturas en instantes anteriores. El parámetro K_3 se obtiene como el producto de una constante obtenida en la LBS por el ratio de extracción de calor real en el instante anterior. Inicialmente, dicho parámetro será 0.

$$\begin{aligned} K_3(i) &= d_2 \cdot DQ_{real}(i-1) \\ K(i) &= K_1(i) - K_2(i) - K_3(i) \\ DQ_{estimado} &= \frac{(W_0 \cdot a_0)}{S + a_0} + \frac{K \cdot S}{S + a_0} \end{aligned}$$

Siendo a_0 una constante obtenida como resultado de la regresión lineal en la LBP.

La temperatura interior resultante se obtiene como: $T_{int_{res}} = \frac{K - DQ_{Real}}{a_0}$.

Una vez detallado el modelo de estimación de la temperatura interior de la sala de estudio para las líneas base desarrolladas, se han aplicado la acción de ciertos controladores con el fin de alcanzar la temperatura de consigna deseada.

En primer lugar, se muestra el sistema sin la ejecución de controladores. Se ha tomado una muestra de un experimento de un día completo (14/06/2021 (13.0h) – 15/06/2021 (13.0h)).

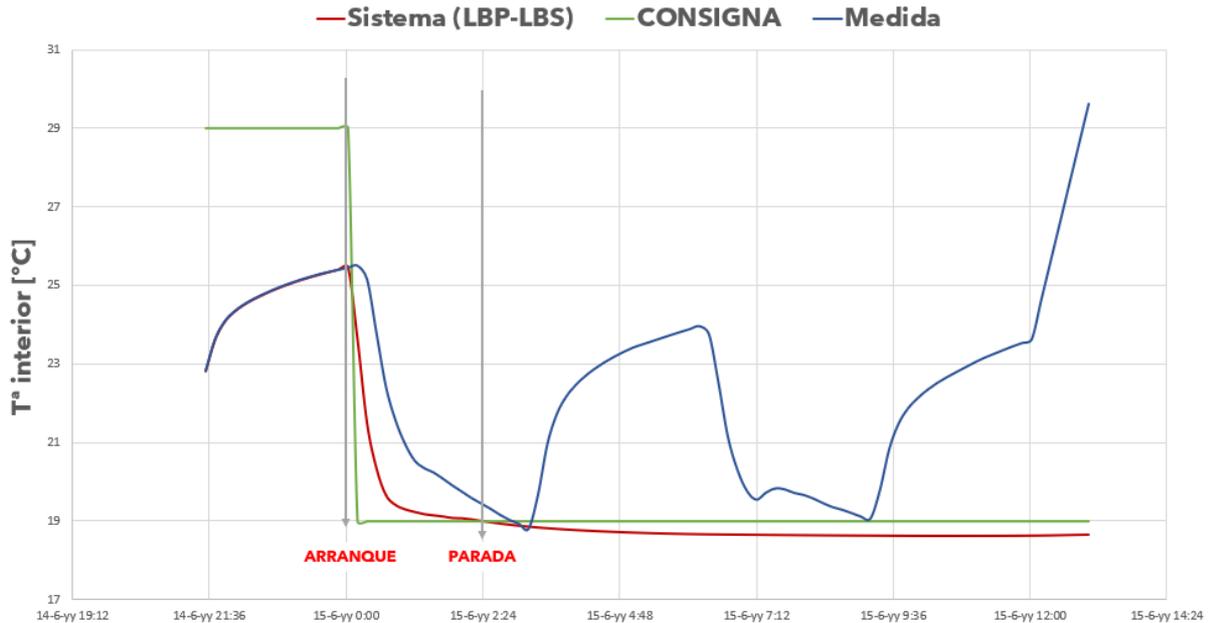


Figura 24. Sistema (LBP - LBS).

En la Figura 24 se muestra el comportamiento del sistema para un cambio de temperatura de consigna de 29°C a 19°C (línea verde). Los ratios de extracción de calor máximo y mínimo son de 6.200W y 1.400W respectivamente, para un throttling de 1,5K.

La línea azul representa el comportamiento real del sistema, mientras que la línea roja representa el comportamiento del sistema estimado. Se puede observar cómo existe una región transitoria que representa el arranque del equipo (en el cual no se produce enfriamiento). Tras este, se produce un descenso de la temperatura lineal en el cual el sistema tiene un comportamiento estable.

Una vez se ha obtenido el comportamiento del sistema de forma aislada, se ha desarrollado la implementación de una serie de controladores:

- **Controlador Proporcional (P).**

Un sistema de control proporcional es un tipo de sistema de control de realimentación lineal. Tiene problemas de comportamiento inestable y lo soluciona mediante la modulación de la salida del dispositivo de control.

La salida del controlador es proporcional a la señal del error, que es la diferencia entre el punto de referencia (en este caso la temperatura de consigna) y la variable del proceso (temperatura interior).

La función de transferencia de este tipo de controlador es una variable real, que determinará el grado de amplificación del elemento de control.

En general, los controladores proporcionales siempre presentan una respuesta con un cierto error permanente, que el sistema es incapaz de compensar.

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

Siendo $u(t)$ la salida del controlador, K_p la ganancia proporcional y $e(t)$ el error cometido respecto al tiempo.

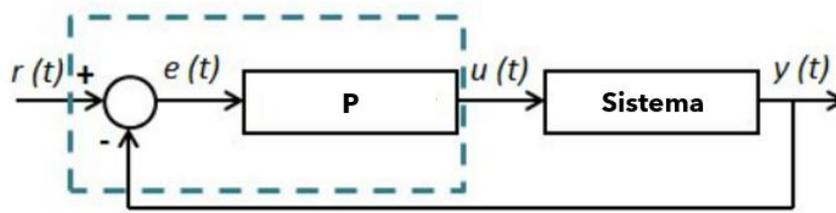


Figura 25. Controlador Proporcional.

En el caso de estudio, se muestra el resultado de la implementación del controlador proporcional en el sistema, para un cambio de temperatura de consigna de 29°C a 19°C para un throttling igual a 1,5K.

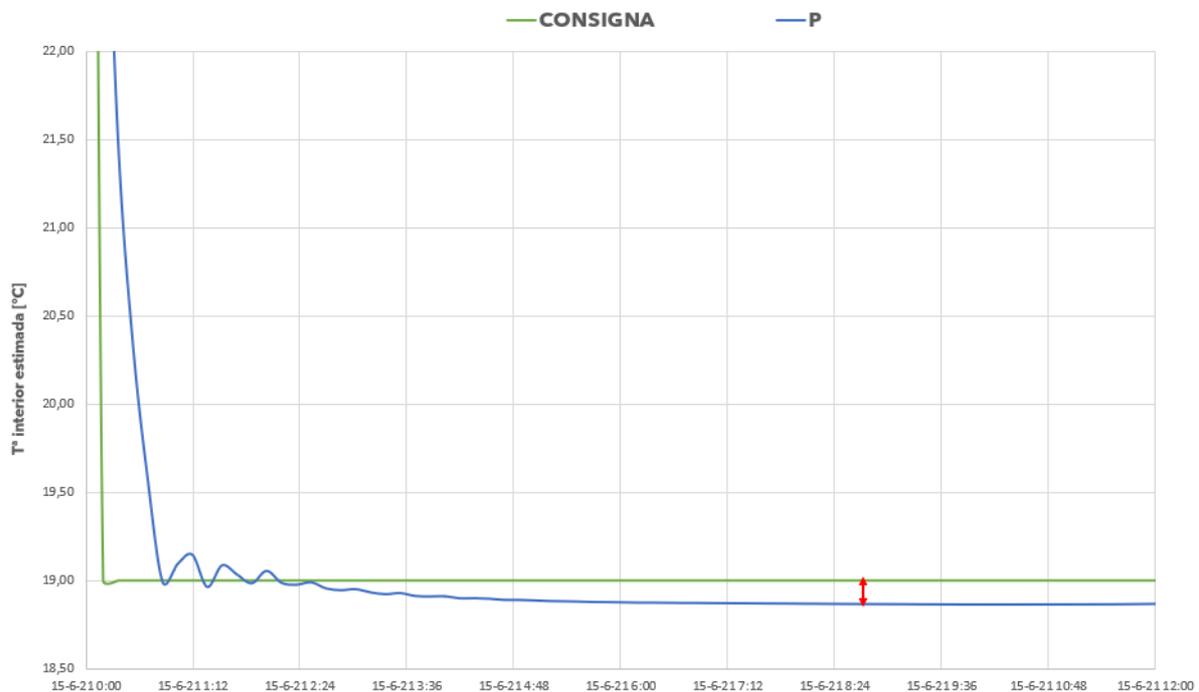


Figura 26. Controlador P.

Como se puede observar en la Figura 23, se comprueba el error permanente según la teoría en este tipo de controladores.

▪ Controlador Integral (I).

El controlador integral tiene como objetivo la disminución y eliminación del error en estado estacionario, provocado por perturbaciones exteriores y los cuales no pueden ser corregidos por el control proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo determinado.

El control integral se utiliza para obviar el inconveniente del offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional.

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) dt$$

Siendo K_i la ganancia integral.

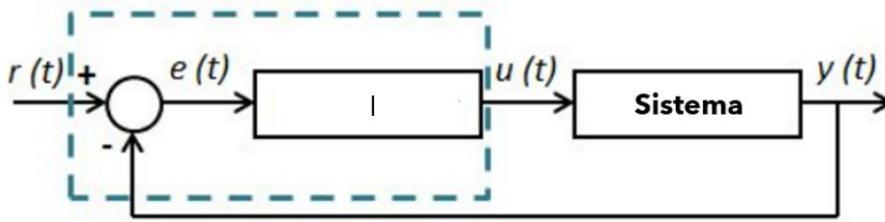


Figura 27. Controlador Integral.

Al igual que para el controlador proporcional, se muestra el resultado de la implementación del controlador integral en el sistema, para un cambio de temperatura de consigna de 29°C a 19°C para un throttling igual a 1,5K.

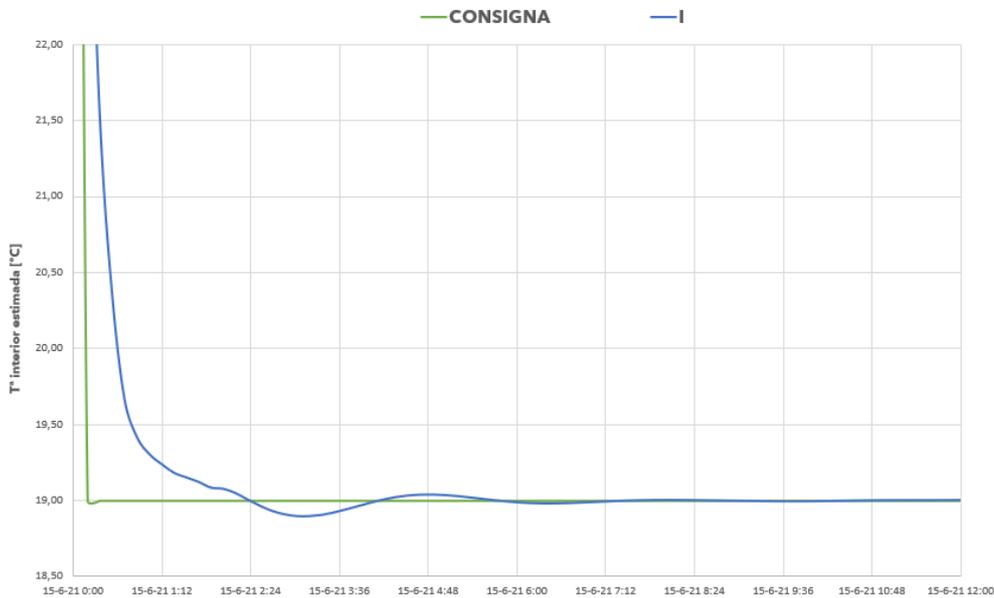


Figura 28. Controlador I.

Se puede observar como un control integral responde de una forma más rápida al control del sistema alcanzando la temperatura de consigna que el controlador proporcional, sin tener en cuenta el error permanente de dicho controlador.

▪ Controlador Derivativo (D).

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error.

El error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor de consigna.

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante K_d . Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordeamente.

Cuando el tiempo de acción derivada es grande, se produce la inestabilidad del sistema. Cuando el tiempo de acción derivada es pequeño, la variable oscila demasiado con relación al punto de consigna. Suele ser poco

utilizada debido al ruido que manifiesta y a las complicaciones que ello conlleva (bastante difícil de sintonizar, por lo que solo es usada cuando se desea anticiparse a algún efecto que pueda tener el sistema en el futuro).

$$u(t) = K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

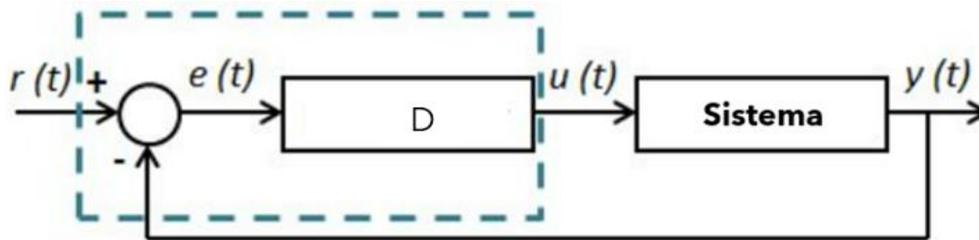


Figura 29. Controlador Derivativo.

Se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la acción del controlador derivativo en el sistema. El diseño del controlador se ha llevado a cabo para que no alcance grandes oscilaciones. La ganancia derivativa no afecta en gran medida a la respuesta del sistema, siendo imposible alcanzar la temperatura interior de consigna aproximada para el tiempo de simulación escogido.

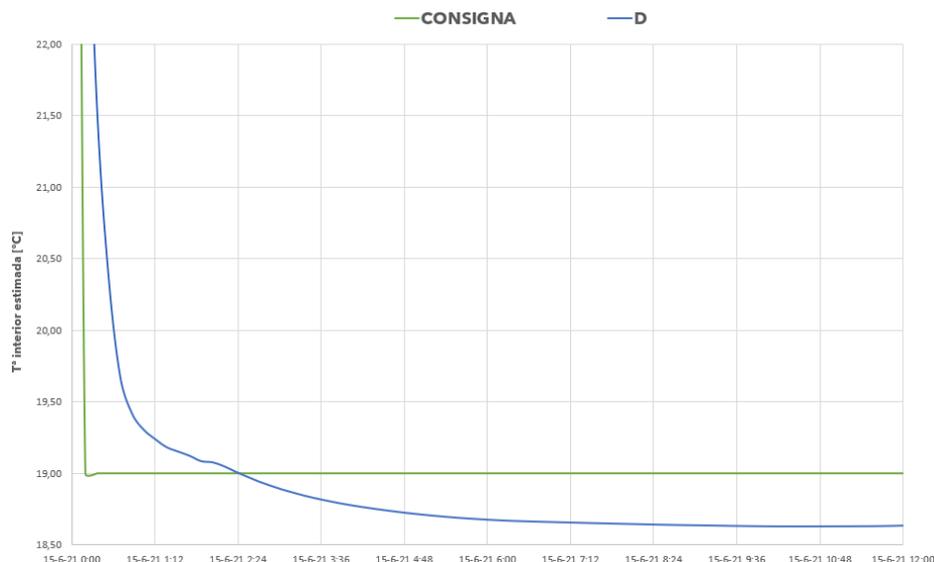


Figura 30. Controlador D.

▪ Controlador Proporcional-Integral (PI).

El controlador Proporcional-Integral es una combinación de la acción proporcional más la acción integral anteriormente descritas. Éste es uno de los controladores más utilizados ya que su principal ventaja es reducir drásticamente el error en estado estable, llega a la estabilidad en menor tiempo.

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con una acción integral, un error pequeño positivo siempre aportará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Con este razonamiento se llega a que el error en régimen permanente será siempre cero,

Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden (se puede demostrar a partir de un ensayo en escalón).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt$$

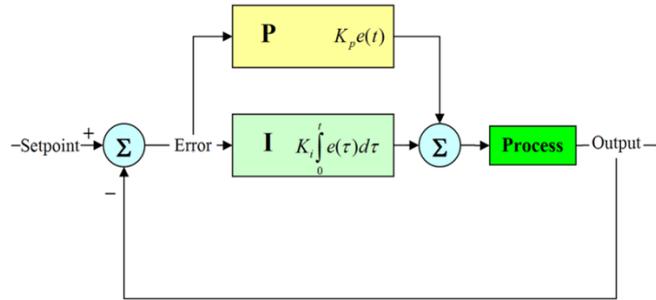


Figura 31. Controlador Proporcional - Integral.

A partir de la implementación del controlador PI en el sistema, se comprueba como la respuesta del sistema por alcanzar la temperatura interior de consigna es más rápida que sólo con la acción integral.



Figura 32. Controlador PI.

▪ **Controlador Proporcional-Derivativo (PD).**

Como su nombre indica, este tipo de controlador combina las acciones proporcional y derivativa.

Esta acción tiene el carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante periodos transitorios.

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir, que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta de forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema, y por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

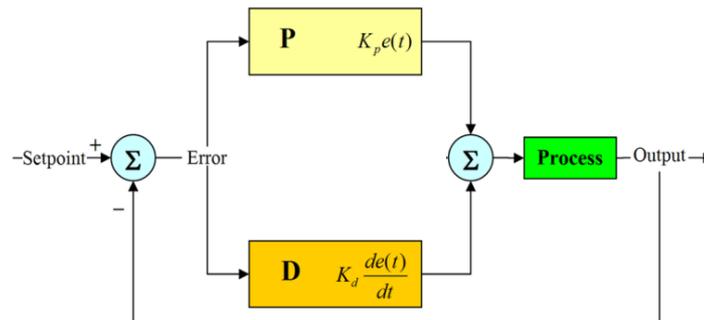


Figura 33. Controlador Proporcional - Derivativo.

Con la implementación de este tipo de controlador en el sistema, se comprueba la respuesta más rápida que con las implementaciones de los controladores proporcional y derivativo por sí solos, pero con las oscilaciones y ruido que introducen este tipo de controladores.

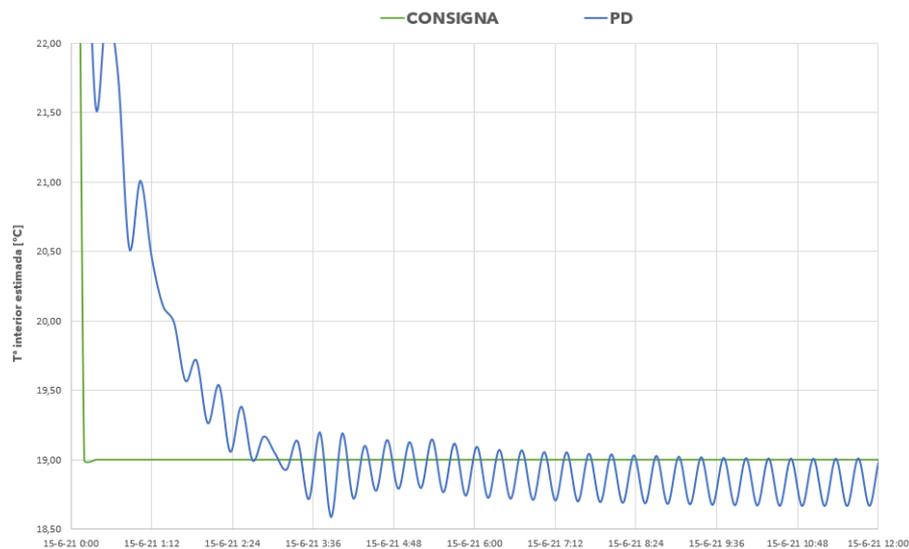


Figura 34. Controlador PD.

▪ Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

El algoritmo del control PID consta de las tres acciones de control: proporcional, integral y derivativa. El valor proporcional depende del error actual, el integral depende de los errores pasados y el derivativo es una predicción de los errores futuros.

El objetivo de los ajustes de los parámetros PID es lograr que el bucle de control corrija eficazmente y en el mínimo tiempo los efectos de las perturbaciones; se tiene que lograr la mínima integral del error. Si los parámetros del controlador PID se eligen incorrectamente, el proceso a controlar puede ser inestable.

El método de Ziegler-Nichols es una metodología que permite realizar un ensayo sobre el sistema a controlar y a partir de ese ensayo se calculan los parámetros del PID necesarios para conseguir una buena respuesta rápida y con poco ruido. Este método se puede realizar según dos métodos según sea la respuesta del sistema sin la acción de controladores (sistema con lazo abierto o lazo cerrado).

Existen ciertas limitaciones en un control PID. Mientras que los controladores PID son aplicables a la mayoría de los problemas de control, puede ser pobres en otras aplicaciones. Los controladores PID, cuando se usan solos, pueden dar un desempeño pobre cuando la ganancia del lazo debe ser reducida para que no se dispare u oscile sobre el valor de la consigna. El control del PID es lineal. Principalmente el desempeño de los controladores PID en sistemas no lineales es variable. También otro problema común que posee el PID es, que,

en la parte derivativa, el ruido puede afectar al sistema, haciendo que esas pequeñas variaciones, hagan que el cambio a la salida sea muy grande.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) dt + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

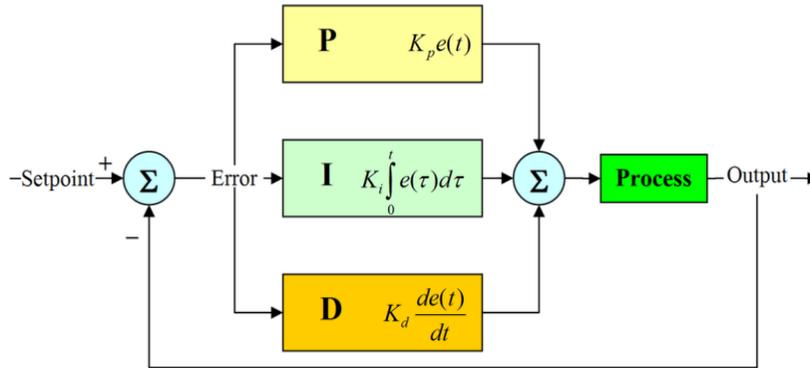


Figura 35. Controlador Proporcional - Integral - Derivativo.

Se ha implementado el controlador PID en el sistema para el mismo escalón de temperatura interior de consigna y el mismo throttling que en los casos anteriores.

Se ha observado que la respuesta del sistema para la temperatura de consigna impuesta es más rápida que en el caso del controlador PD, pero no más que en el caso del PI. El efecto de la acción derivativa perjudica la respuesta del sistema con mayor ruido y sobreoscilaciones. Además, el permanente al que llega se centra más alrededor de la temperatura de consigna que el controlador PD, a pesar de las oscilaciones producidas.

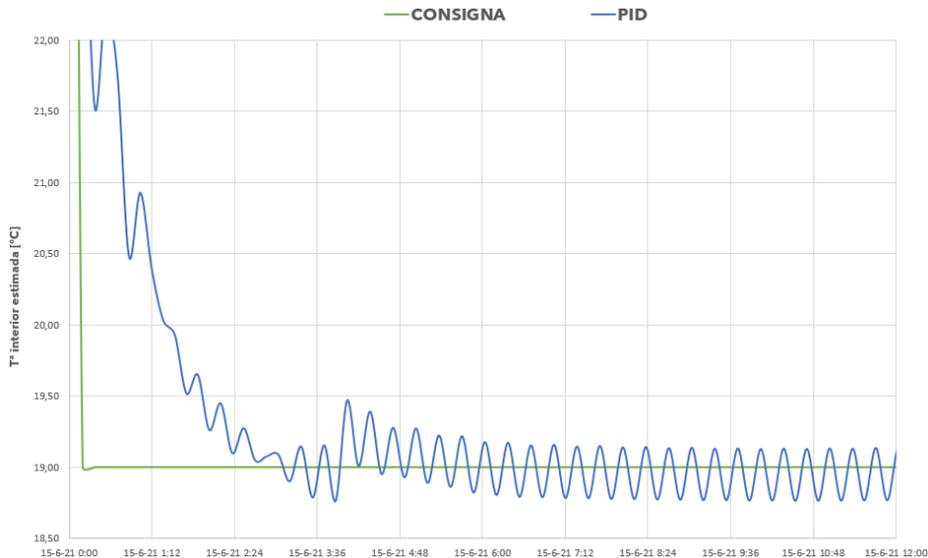


Figura 36. Controlador PID.

A continuación, se muestra una comparativa de los tres tipos de controladores (PI, PD y PID):

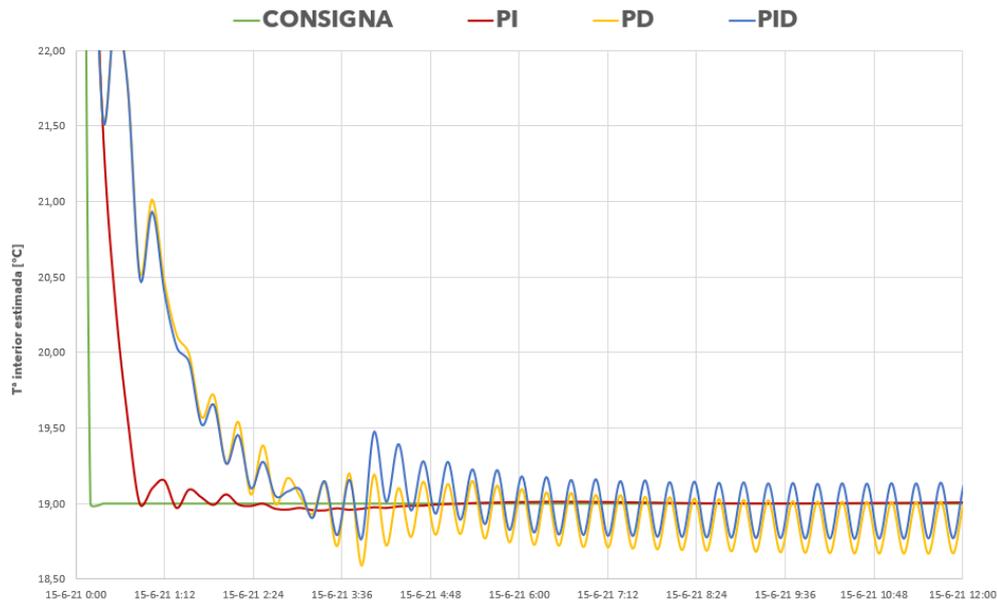


Figura 37. Comparativa PI, PD y PID.

Con el desarrollo del análisis realizado para el sistema en cuestión, se llega a que el controlador que mejor ajusta la temperatura interior estimada a la de consigna, con el ajuste óptimo de las constantes de control en cada uno de los controladores, es el controlador Proporcional-Integral (PI), ya que alcanza el permanente más rápido que los otros dos controladores y de forma más limpia. El efecto del control de la acción derivativa perjudica al comportamiento de este sistema.

Por último, se observa en la Figura 35, los errores absolutos para los tres tipos de controladores:



Figura 38. Errores absolutos controladores PI, PD y PID.

Se puede observar, como los controladores que poseen una acción integral alcanzan un error absoluto inicial más grande, en comparación con el controlador PD. Tras el instante inicial, el controlador PI alcanza un error nulo en permanente, al contrario de los otros dos controladores, que debido a la acción derivativa se producen, al igual que en el comportamiento del sistema, efectos oscilatorios.

Se concluye que el controlador Proporcional-Integral (PI) es el óptimo para el control del sistema en la caracterización del edificio realizada junto con el funcionamiento del split instalado.

3.4. Caracterización del suelo radiante

En este subapartado, se procede a detallar el método llevado a cabo para obtener la caracterización del suelo radiante aislado.

La caracterización del suelo radiante se ha basado en una caracterización experimental de un día tipo (28/03/2022) a partir de la sensorización instalada en el interior del centro de experimentación detallada anteriormente en el subapartado 3.1.

Se han obtenido los distintos parámetros para el día tipo: temperaturas de muros, temperaturas de embebidos en los distintos puntos donde se han dispuesto los sensores, temperatura de aire y temperaturas radiantes media del suelo y de la sala.

En primer lugar, se ha obtenido una temperatura media del aire del interior de la sala de experimentación para el día tipo como un promedio de las temperaturas obtenidas por los sensores:

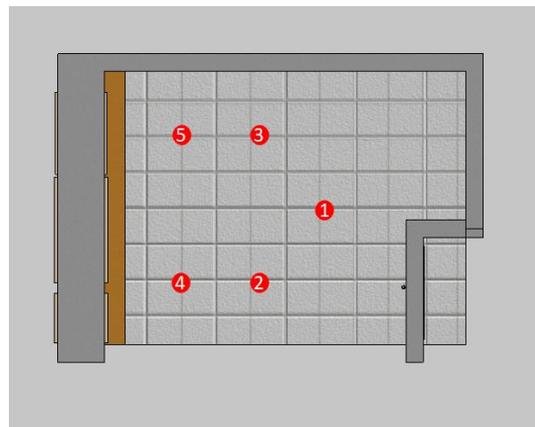


Figura 39. Sensores interiores aire.

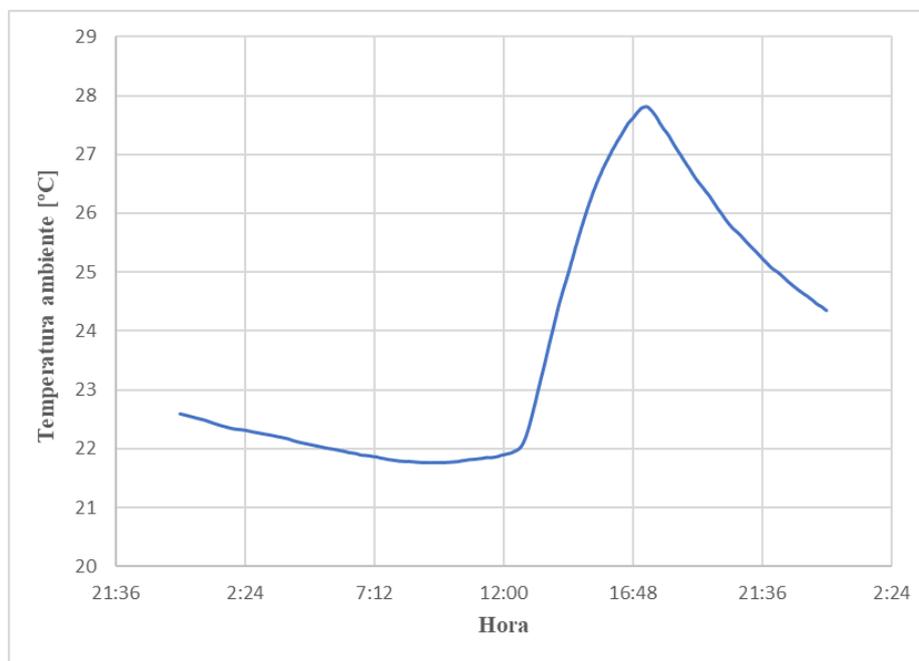


Gráfico 3. T^a media del aire interior de la sala.

Se observa que a las 12:28h se produce el arranque.

A continuación, se han obtenido las temperaturas de los embebidos y sobre éstos mediante la sensorización

previa:

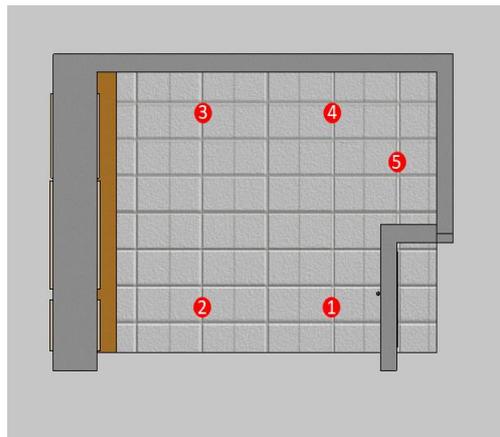


Gráfico 4. Sensorización embebidos.

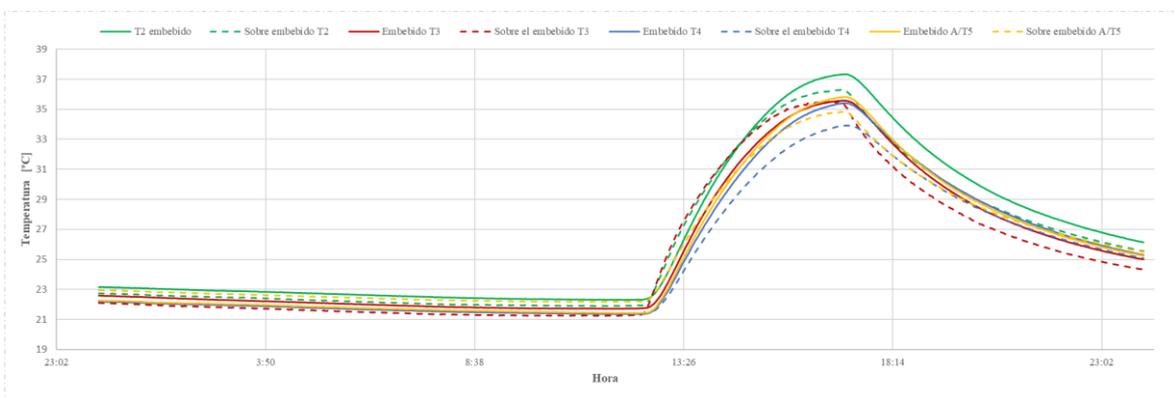


Gráfico 5. Temperaturas embebidos.

Respecto a las temperaturas superficiales interiores, se han dispuesto sensores a distintas alturas en las superficies de la sala de experimentación del día indicado:

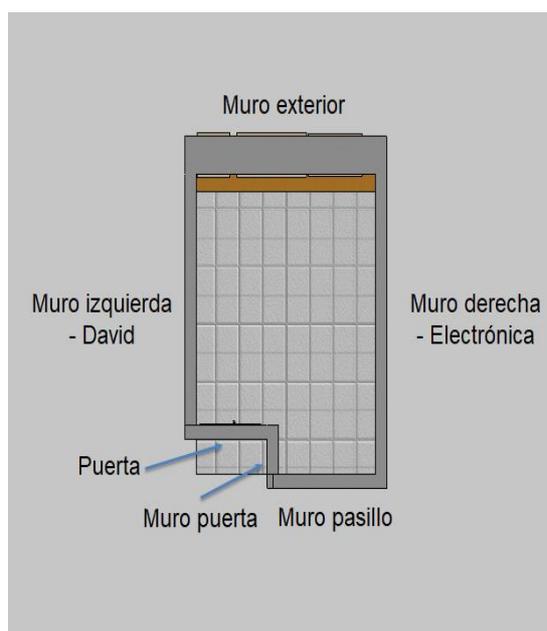


Figura 40. Disposición muros de la sala.

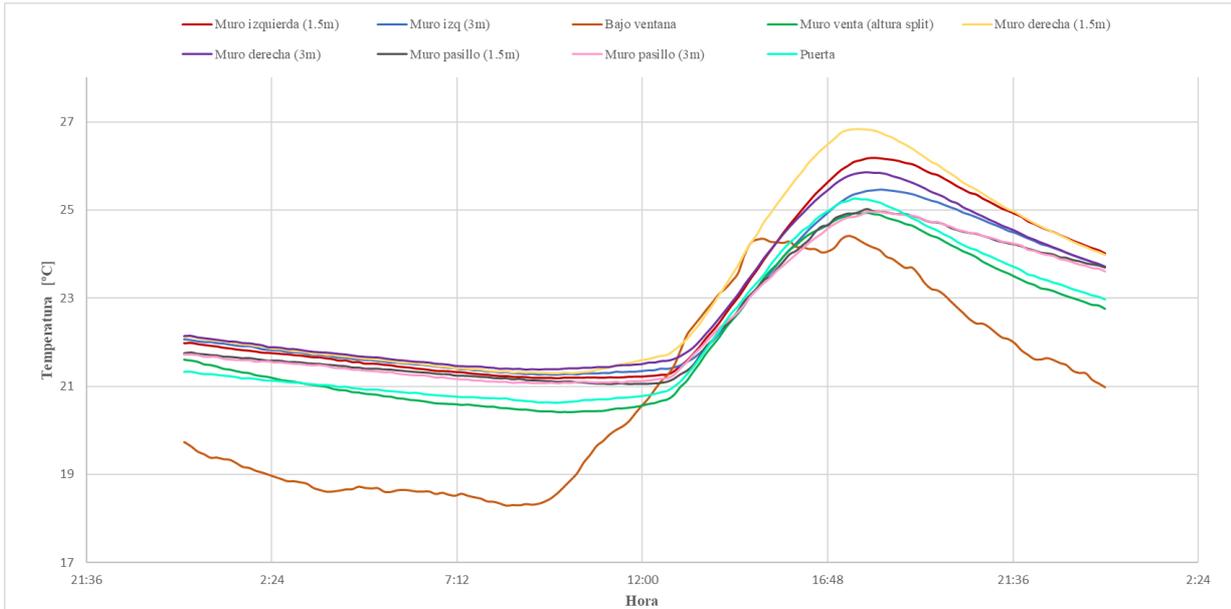


Gráfico 6. Temperaturas superficiales interiores.

De forma análoga se han obtenido las temperaturas superficiales exteriores:

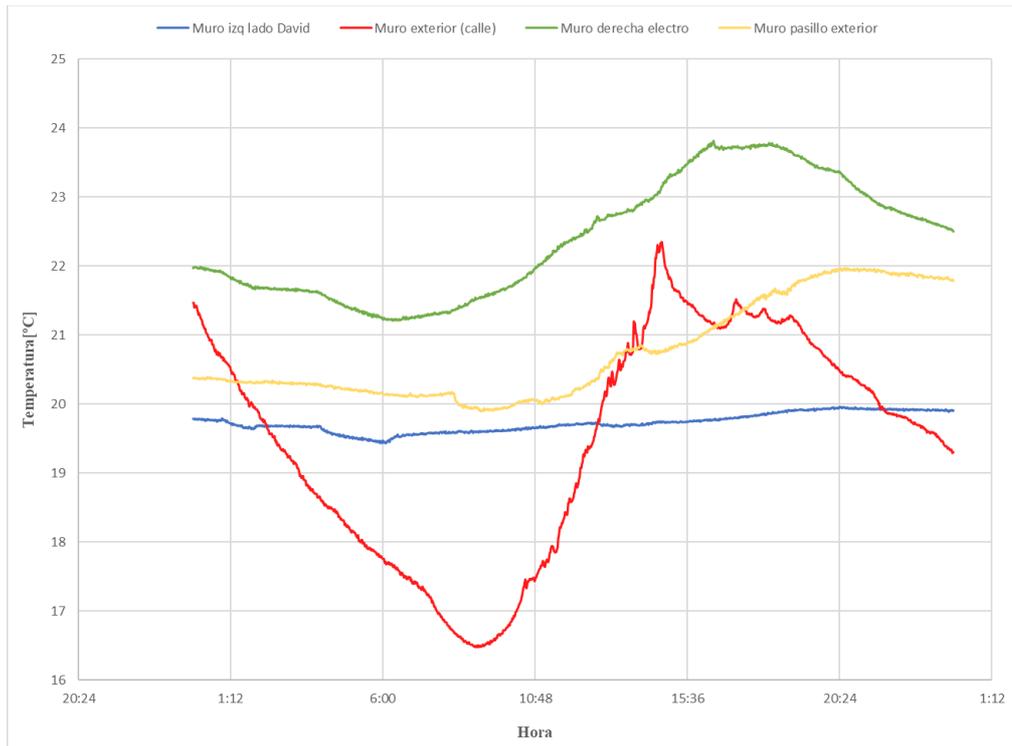


Gráfico 7. Temperaturas superficiales exteriores.

Para el cálculo de la temperatura radiante media, se ha recurrido a un software externo (*Engineering Equation Solve-EES*) para el cálculo de coeficientes de película, con los que se han obtenido los siguientes factores de forma correspondientes a las superficies del espacio:

F ventana	F 1a	F 1b	F 3	F 4	F 5	F 6
0,04206	0,089	0,02393	0,155	0,2569	0,2165	0,2165

Tabla 3. Factores de forma para T^a radiante media.

Se puede obtener calor del fluido a partir de la expresión:

$$Q_{fluido} = \dot{m}_{fluido} \cdot c_p \cdot (T_{imp} - T_{ret})$$

Donde: \dot{m}_{fluido} es el caudal constante del agua tomado como dato (900 l/h), c_p es el calor específico del agua tomado como 4.180 J/kgK y, por último, T_{imp} y T_{ret} son las temperaturas de impulsión y retorno del agua respectivamente, las cuales son medidas, por tanto, tomadas como datos.

A continuación, se muestran las temperaturas de impulsión y retorno medidas a partir del arranque:

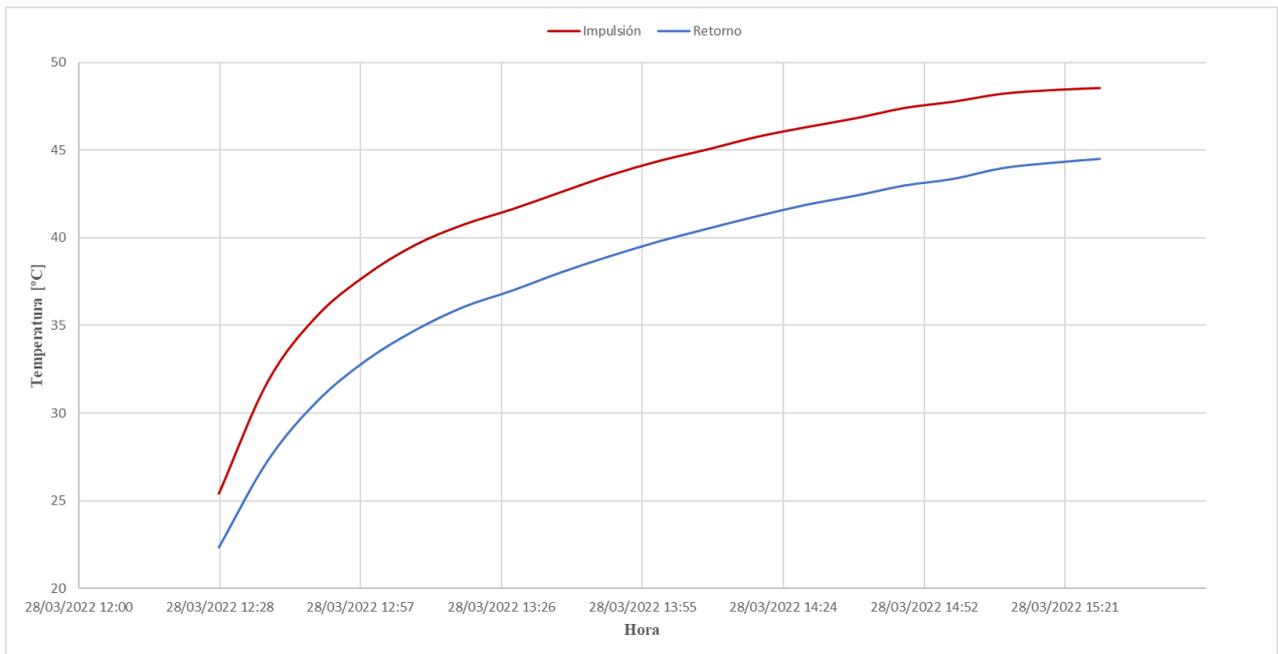


Gráfico 8. Temperaturas de impulsión y retorno medidas.

Por tanto, una vez se tiene el calor del fluido, la temperatura media del aire y la temperatura de impulsión del agua, se realizan regresiones lineales para el cálculo de CR (Razón Común), siendo ésta el calor del fluido en el instante (t-1):

Qfluido	Timp -Taire	Timp -Taire (t-1)	Timp -Taire (t-2)	Qfluido (t-1)	CR	ΔT (t-2)	ΔT (t-1)	ΔT
3,19	3,45							
4,70	9,79	3,45		3,19	0,828449407	0,082606795	-0,435064793	0,38439365
5,09	13,37	9,79	3,45	4,70	0,04817694	0,077272579	0,227190312	0,15641099
5,08	15,45	13,37	9,79	5,09				
5,08	16,87	15,45	13,37	5,08				
4,91	17,73	16,87	15,45	5,08				
4,85	18,30	17,73	16,87	4,91				
4,79	18,96	18,30	17,73	4,85				
4,83	19,61	18,96	18,30	4,79				
4,80	20,10	19,61	18,96	4,83				
4,72	20,47	20,10	19,61	4,80				
4,73	20,93	20,47	20,10	4,72				
4,63	21,22	20,93	20,47	4,73				
4,62	21,45	21,22	20,93	4,63				
4,63	21,77	21,45	21,22	4,62				
4,61	21,88	21,77	21,45	4,63				
4,44	22,09	21,88	21,77	4,61				
4,35	22,09	22,09	21,88	4,44				
4,23	22,01	22,09	22,09	4,35				

Tabla 4. Cálculo Qfluido en instante inicial y anterior | Regresión lineal.

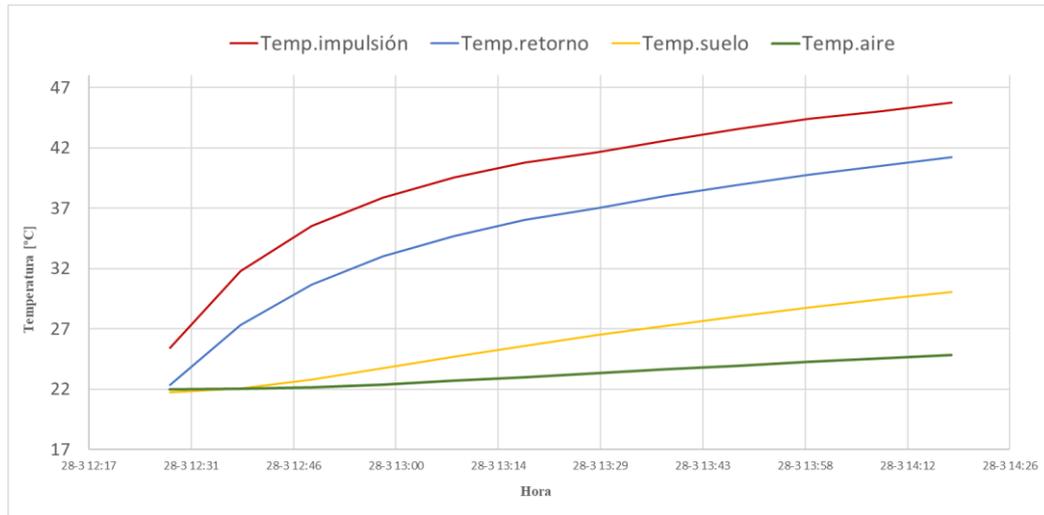


Gráfico 9. Temperaturas de impulsión, retorno, superficial y del aire medias.

El calor del fluido estimado en el instante (t) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_{fluido}(t) = \sum_{k=0}^{na/w} c_{a-w,k} \cdot T_a(t-k) - \sum_{j=0}^{nw/w} c_{w-w,j} \cdot T_w(0, t-j) + CR \cdot Q_{fluido}(t-1)$$

En el que la temperatura del aire es constante, por lo que sólo se calcula c_{w-w} y CR.

A partir de las siguientes expresiones, se obtienen la constante permanente (CP) y la constante de tiempo (τ) respectivamente:

$$\frac{\sum_{j=0}^{nw/w} c_{w-w,j}}{1 - CR} = CP = 0,186$$

$$CR = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \rightarrow \tau = 42,5 \text{ min}$$

Donde Δt es el periodo de tiempo tomado cada 10min.

Se observa en la siguiente figura, el ajuste del calor del fluido estimado frente al calor del fluido medido en el instante (t):

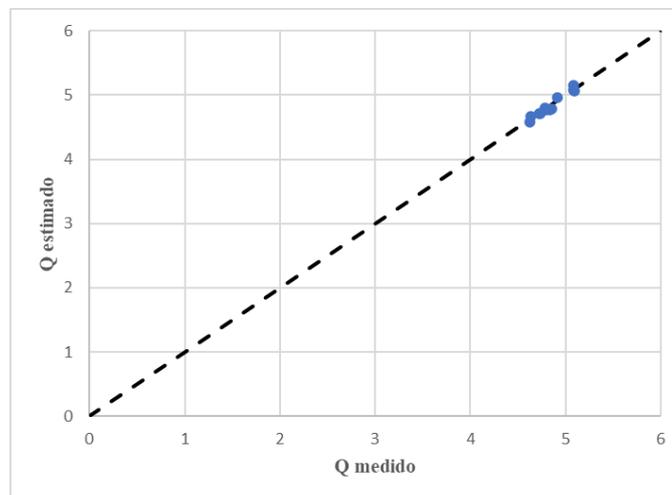


Gráfico 10. Ajuste $Q_{medido} - Q_{estimado}$.

Se observa, como a partir de una función de transferencia experimental, mediante 3 numeradores y 1 denominador, se ajusta el calor del fluido estimado al calor de fluido medido hacia el aire para el mismo instante.

3.5. Acople del suelo radiante y recinto

En este punto, se pretende mostrar el acoplamiento implementado de las funciones de transferencia para la variación de la temperatura del aire interior en función del flujo de calor procedente del panel radiante.

Para ello, se han realizado una serie de simplificaciones e hipótesis para facilitar el acoplamiento de ambos. Se va a tomar como datos de entrada:

- \dot{m} : Caudal de agua.
- $T_{w,0}$: Temperatura del agua a la entrada del instante actual.
- $T_{aire,2}$: Temperatura del aire antes de que opere el panel radiante.

Además, se necesitarán los términos inerciales y del instante anterior:

- $T_s(t)$: Temperatura del sólido en el instante anterior.
- T_a : Temperatura equivalente con superficies y aire del instante anterior.
- $B(t)$: Inercia del recinto (LBS).

Como incógnitas del sistema acoplado se tendrán:

- $T_s(t+\Delta t)$: Temperatura del sólido en el instante actual.
- Q_{fluido} : Calor del fluido en el instante actual.
- $\Delta Q_{sólido}$: Incremento de calor en la superficie del sólido desde en instante t hasta $t+\Delta t$.
- ΔQ_{pr} : Incremento de calor transferido al aire.
- $T_{aire,3}$: Temperatura del aire obtenida funcionando el panel radiante.
- T_{suelo} : Temperatura del suelo en el instante t .
- $T_{w,L}(t+\Delta t)$: Temperatura del agua de salida del panel en el instante actual.

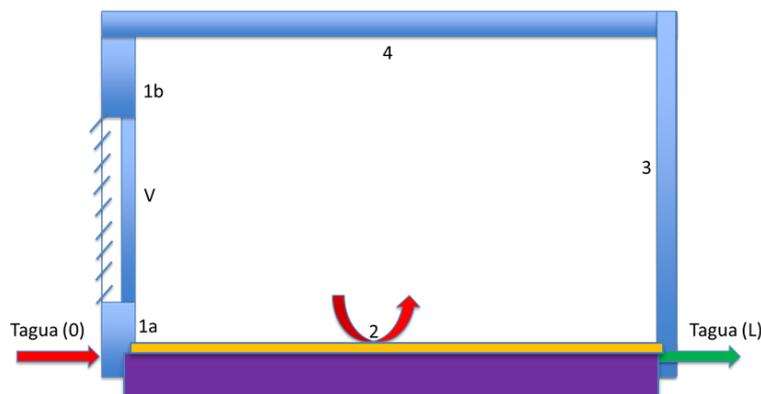


Figura 41. Recinto con panel radiante de estudio.

La temperatura del aire equivalente se obtiene por definición, como la media entre la temperatura del aire seca y la temperatura radiante media obtenida a partir de los factores de forma:

$$T_a(t) = \frac{T_{am}(t) + T_{rm}(t)}{2}$$

Para ello, se realiza el siguiente balance respecto al tiempo de la temperatura del sólido:

$$-M_S \cdot c_{ps} \cdot \frac{\partial T_S}{\partial t} = \left(\dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{h_f \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right) + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_a \cdot A_a} \right) + R_{cd}} \right) \cdot \left(T_S - \frac{\left(\dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{h_f \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right) \cdot T_0 + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_a \cdot A_a} \right) + R_{cd}} \cdot T_a \right)}{\dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{h_f \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right) + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_a \cdot A_a} \right) + R_{cd}}} \right)$$

Donde:

- h_a : Coeficiente de película del aire [W/m²K].
- A_a : Área de la sala [m²].
- h_f : Coeficiente de película del fluido [W/m²K].
- A_{Tf} : Área de transferencia del fluido [m²].
- R_{cd} : Resistencia térmica por conducción. Obtenida de forma experimental suponiendo coeficientes de película interior y exterior.

Por otro lado, se tienen las ecuaciones del calor del fluido hacia el aire:

$$Q_{fluido} = UA \cdot DTLM = UA \cdot \frac{(T_{imp} - T_{sup}) - (T_{ret} - T_{sup})}{\ln\left(\frac{T_{imp} - T_{sup}}{T_{ret} - T_{sup}}\right)} = Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{UA}{\dot{m} \cdot c_p}\right)} \right) \cdot (T_{sup} - T_{imp})$$

Realizando los siguientes cambios de variables para facilitar el manejo de la ecuación:

$$K_1 = \dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{h \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right) + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_a \cdot A_a} \right) + R_{cd}}$$

$$K_2 = \dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{h \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right)$$

$$K_3 = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_a \cdot A_a} \right) + R_{cd}}$$

Con los cambios anteriores queda el balance como:

$$-M_S \cdot c_{ps} \cdot \frac{\partial T_S}{\partial t} = K_1 \cdot \left(T_S - \frac{(K_2 \cdot T_0 + K_3 \cdot T_a)}{K_1} \right)$$

Integrando en función del tiempo desde t hasta t+Δt, se obtiene la temperatura del sólido en el instante actual:

$$T_S^{t+\Delta t} = \left(\frac{K_2}{K_1} \cdot T_0^{t+\Delta t} + \frac{K_3}{K_1} \cdot T_a^t \right) + \left(T_S^t - \frac{(K_2 \cdot T_0^{t+\Delta t} + K_3 \cdot T_a^t)}{K_1} \right) \cdot e^{-K_1 \cdot \frac{\Delta t}{M_S \cdot c_{ps}}}$$

Se obtiene la temperatura en régimen permanente (T_{rp}):

$$T = T_{rp} + (T_0 - T_{rp}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_{rp} = \frac{\left(\left(\dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{-h \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right) \right) \cdot T_0 + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_a \cdot A_a} \right) + R_{cd}} \cdot T_a \right)}{\dot{m} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{-h \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right) + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_a \cdot A_a} \right) + R_{cd}}}$$

Por otro lado, se obtiene el calor del fluido en el instante actual como:

$$Q_{fluido} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_S^{t+\Delta t} - T_{w,0}^{t+\Delta t}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{-h \cdot A_{Tf}}{\dot{m} \cdot c_p}} \right)$$

La variación de calor del sólido desde el instante t hasta $(t+\Delta t)$ se obtiene como:

$$\Delta Q_{sólido} = M_S \cdot c_{p_S} \cdot (T_S^{t+\Delta t} - T_S^t)$$

El incremento de calor transferido al aire, se obtendrá, por tanto, como:

$$\Delta Q_{pr} = Q_{fluido} - \Delta Q_{sólido}$$

A partir de la variación de calor transferido al aire, se puede hallar, teniendo en cuenta la inercia del edificio (LBS) y la regresión lineal anteriormente obtenida, se puede hallar la temperatura del aire obtenida con el funcionamiento del panel radiante:

$$\Delta Q_{pr}(t) = c_o \cdot (T_{aire3}(t) - T_{aire2}(t)) + B(t)$$

Donde, c_o es el primer término de la regresión realizada en la LBS. Se considera la diferencia de calor transferido al aire como una Línea Base Terciaria (LBT), siendo los coeficientes los mismos que en la LBS.

Además, se puede obtener la temperatura del suelo requerida:

$$\Delta Q_{pr} = h_a \cdot A_a \cdot (T_{suelo} - T_a)$$

Por último, se calculará la temperatura de salida del fluido del panel radiante en el instante actual:

$$Q_{fluido}(t + \Delta t) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{w,L}^{t+\Delta t} - T_{w,0}^{t+\Delta t})$$

Una vez desarrollado el modelo matemático, se han realizado experimentos que han permitido analizar el sistema de acople del edificio y la instalación. A continuación, se muestran los parámetros tomados en los experimentos en el permanente:

- Temperatura característica de impulsión: 36 °C.
- Temperatura característica de retorno: 32,4 °C.
- Temperatura del aire: 20 °C.

- Potencia característica cedida: 3,8 kW.
- Orden de magnitud de la transmitancia: 7,8 W/m²K.

Se van a tomar como datos e hipótesis de partida, a partir de los experimentos realizados, los siguientes:

- $\dot{m} = 0,25$ kg/s.
- $A_a = 30$ m², $A_{t_f} = 7,5$ m².
- $h_a = 7,5$ W/m²K, $h_f = 1.861$ W/m²K.
- $M_s = 2.000$ kg/s, $c_p = 1.000$ kJ/kgK.
- $R_{cd} = 0,029$ m²K/W.

A partir de los datos tomados y mediante la sensorización realizada para el día tipo, se obtiene el siguiente resultado:

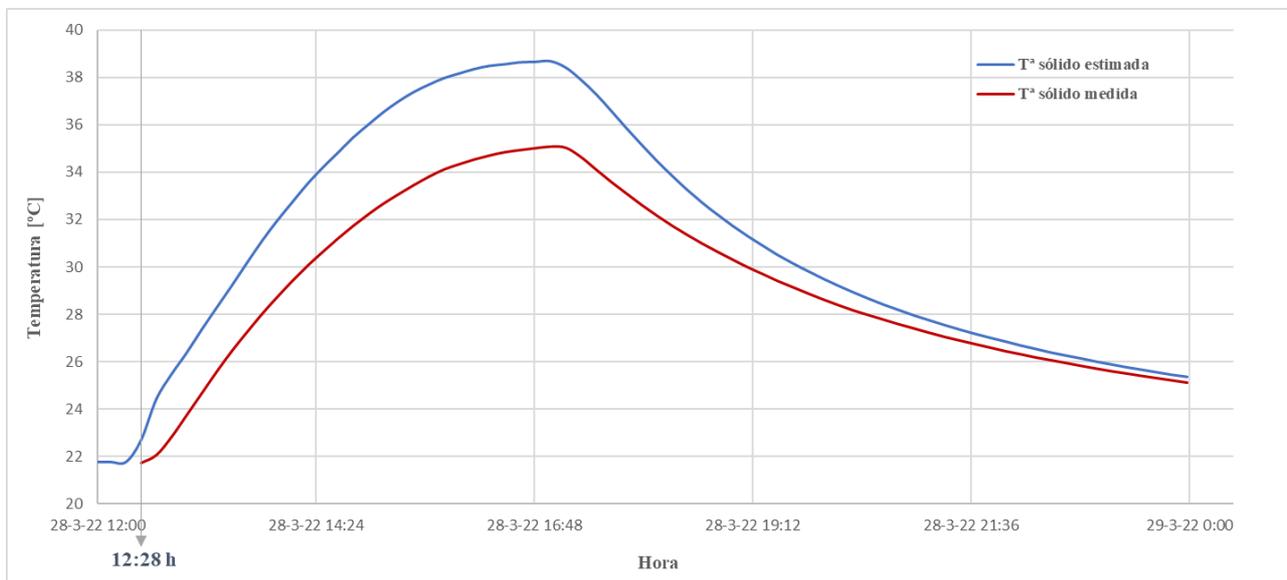


Gráfico 11. Tª del sólido estimada | medida [°C].

Se puede observar en el Gráfico 9, la evolución de la temperatura del sólido estimada y medida a partir del arranque realizado a las 12:28 h. Se comprueba, como a partir de la función de transferencia realizada del acople entre el suelo radiante y el recinto de experimentación se puede obtener una estimación de la temperatura del sólido, con un error máximo 3,5 °C aproximadamente, respecto a la medida, antes de alcanzar el permanente.

Cabe destacar que durante el arranque, el gran amortiguamiento que experimenta el flujo de calor hasta alcanzar una estabilidad. Realmente, es un problema que hay que solventar en un proyecto futuro debido a que el alcance de la temperatura del aire en el ambiente tarda bastante en llegar al valor deseado, y el sobresalto producido en el arranque del calor del aire hacia el fluido.

3.6. Revisión del control en suelos radiantes

En este punto, se pretende realizar una revisión de distintas formas de control en edificios con suelos radiantes instalados encontrados en varias referencias bibliográficas con el fin de obtener una visión global de las distintas formas de control de suelo radiante y para poder aplicarlas posteriormente a un sistema de control predictivo.

A continuación, se describen los métodos de control encontrados en las distintas referencias bibliográficas:

1. *The Control Methods for Radiant Floor Heating in High-Rise Residential Building.* [6]

Este artículo propone un estudio de métodos de control para los edificios residenciales de gran altura en función de la temperatura del agua de suministro, control del agua de suministro y control de la temperatura del agua de suministro más el caudal.

Se expone que para los edificios residenciales, el método de control simple utilizado de on/off no puede responder de forma eficiente a los cambios de cargas térmicas y causar escenarios de sobrecalentamientos o calefacción insuficiente. Por tanto, se requiere de un sistema de control más eficiente para este tipo de edificios.

En los edificios residenciales de gran altura, se adopta el sistema de muro cortina hermético para evitar una infiltración excesiva y la profundidad del forjado disminuye para aligerar la estructura del edificio. De este modo, se puede reducir la capacidad de almacenamiento de calor de la estructura.

Se han realizado simulaciones para evaluar el efecto de las masas térmicas y de la radiación solar para un edificio tipo de baja altura y para un edificio residencial de gran altura a partir del software Transys, definiendo unas condiciones térmicas y de humedad específicas. En estas simulaciones se llega a la conclusión de que la carga térmica para los edificios residenciales de baja altura se mantiene relativamente estables por lo que el control no necesita responder a cambios bruscos de la carga térmica, pero en caso de no tener un balcón, es considerable la fluctuación de la carga térmica teniendo que ser compensada por un método de control más exacto. En el caso de los edificios residenciales de gran altura, las fluctuaciones de cargas térmicas son excesivas debido a los grandes acristalamientos y a la baja capacidad térmica propias de estos edificios.

Se ha realizado una comparativa de varios métodos de control de suelo radiante realizados por distintos investigadores (MacCluer 1989, Leigh 1992, Gibbs 1994, Cho 1999, Rekstad 2003).

Como parámetros de control se distinguen entre variables de entrada, variables controladas y variables manipuladas:

Parámetros de control	Parámetros disponibles	Sistema de control	
Variables de entrada	Temperatura de salida, temperatura de la habitación	Sensor de Temperatura	
	Temperatura del agua de entrada, temperatura del agua de salida		
Variables controladas	Temperatura de la habitación, temperatura operativa	Termostato	
Variables manipulables	Temperatura de entrada del agua	Intercambiador de calor, Válvula mezcladora	
	Ratio de flujo de agua de entrada	Continuo	Válvula modulante de 2 vías
		Intermitente	Válvula on/off
	Flujo de calor	Controlador de caldera	

Tabla 5. Parámetros de control para sistema de calefacción de suelo radiante [6]

El calor de salida de la superficie del suelo se puede determinar a partir del caudal de agua y de la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua.

En cuanto a una clasificación de los métodos de control para el suelo radiante, pueden ser clasificados por la combinación la alimentación, control de la temperatura del agua, control del caudal de agua de alimentación y modulación del flujo en función de las variables manipuladas.

Métodos de control			Temperatura del agua de entrada		Flujo de calor	
			Temperatura constante	Temperatura variable		
Ratio de flujo	Flujo continuo	Flujo constante	-	Control de reseteo exterior Reseteo exterior con realimentación controlada de la temperatura de entrada	Modulación del flujo	
		Flujo variable	Control del flujo variable	-	-	
	Flujo intermitente	Control bang-bang	Control bang-bang on/off	Reseteo exterior + Control bang-bang	-	-
		PWM ('Pulse-width modulation')	Control PWM on/off	Reseteo exterior + Control PWM on/off	-	-

Tabla 6. Clasificación de los métodos de control para sistema de calefacción con suelo radiante [6]

El control bang-bang on/off es el más instalado en los apartamentos en Korea. La aplicación del control del flujo variable es inusual porque es difícil el control del flujo en el rango de baja carga debido a la correlación no-lineal entre el calor de salida y el ratio de flujo.

Se han realizado algunos experimentos con el fin de comparar los distintos métodos de control.

A partir de los experimentos se llegan a las siguientes conclusiones:

- En el caso de mantener la temperatura del aire de la habitación y la temperatura de la superficie del suelo estable, es más ventajoso aplicar el control de la temperatura del agua que el método de control del flujo del agua.
- Es recomendable el uso del control de reseteo exterior en combinación del control simple de encendido/apagado bang-bang para reducir la fluctuación de la temperatura del aire de la habitación.
- En el caso de aplicar el control de la temperatura del agua o el control de la temperatura del agua más el del flujo, es necesario equipar dispositivos de retroceso debido al tiempo prolongado de subida durante el tiempo de arranque de la calefacción.
- Respecto a los edificios residenciales de gran altura, es más ventajoso aplicar el reajuste exterior más el control PWM que el reseteo exterior más el control de encendido/apagado en términos de estabilidad de la temperatura y el ahorro de energía.

2. *Augmented control strategies for radiant floor heating Systems.* [7]

Este artículo muestra un modelo dinámico de calefacción de suelo radiante para el análisis de control. El modelo desarrollado engloba una caldera, un sistema de distribución, un tubo embebido y el cerramiento del edificio. Se proponen dos estrategias de control para la regulación de la temperatura. El modelo es descrito a partir de ecuaciones diferenciales no-lineales que fueron resueltas a partir de métodos numéricos finitos. Hay: un control multietapa de encendido/apagado y un control aumentado de ganancia constante. La ventaja de las estrategias de control propuestas es que eliminan el uso de sensores de temperatura exterior requeridos en esquemas de control de salida.

A) Control multietapa on/off.

En lugar de hacer funcionar la válvula en modo totalmente ON o completamente OFF en respuesta a la señal del termostato de la zona, un enfoque alternativo explorado en este estudio requiere que el recorrido de la válvula se realice por etapas. A medida que se incrementa el número de etapas, se espera que las respuestas del control multietapa se aproximen a las del control proporcional. Sin embargo, desde el punto de vista de la simplicidad, se considera que un esquema de control de dos etapas en el que se modula la temperatura del agua de suministro a la superficie del suelo se modula utilizando el siguiente algoritmo:

$$\begin{aligned} & \text{Si } T_z \geq T_{max}; m_s = 0, m_b = 1 \\ & \text{Si } (T_{max} - 0,75 \cdot TR) < T_z \leq (T_{max} - 0,25 \cdot TR); m_s = m_b = 0,5 \\ & \text{Si } T_z < T_{min}; m_s = 1, m_b = 0 \end{aligned}$$

Donde m_s es el ratio de flujo de agua de suministro al suelo, m_b es flujo de agua bypass, T_{max} y T_{min} son los límites del ajuste de la zona termostática y TR es el *Throttling Range*.

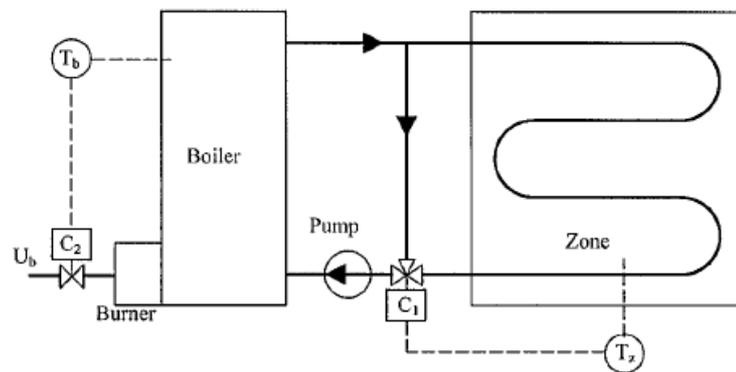


Figura 42. [7]

B) Control de ganancia constante aumentado.

El típico controlador de modulación utilizado en los sistemas de HVAC es un controlador de tipo proporcional. En los sistemas de bucle cerrado, un sensor proporciona una señal de retroalimentación de una variable controlada. Este variable se compara con un punto de consigna y la diferencia, conocida como error, se multiplica por una constante llamada ganancia para obtener una salida. La señal de salida se envía al actuador, iniciando así la regulación del proceso.

Cuanto mayor sea la ganancia, más rápida será la respuesta del sistema de control. Sin embargo, una mayor ganancia causará un sobreimpulso de la variable controlada y el sistema podría entrar en bucle infinito. Con el fin de mejorar la estabilidad del sistema y evitar que el sistema responda con lentitud, se añade un offset inicial de manera que un controlador proporcional típico se expresa matemáticamente como:

$U = C + G \cdot E$, donde C es el offset, G es la ganancia proporcional y E es el error dado por la diferencia de temperaturas con la consigna. Hay varias formas de que un controlador puedan ser aumentado. Hay una versión simple propuesta que puede ser descrita por el siguiente algoritmo de control:

$$U_n = P \cdot U_{n-1} + (1 - P) \cdot K \cdot E_n$$

La ventaja de este controlador aumentador es que permite modificar el término del conjunto (C) para incluir un conjunto variable en el tiempo que es escalado por un parámetro P . Además, el segundo término de la ecuación también mejora el algoritmo de control a través de otro factor de escala $(1-P)$. El aspecto importante en el uso de este algoritmo de control es la selección de las magnitudes de los parámetros P y K . En este artículo se utiliza un enfoque heurístico para seleccionar los parámetros de sintonía P y K .

Se han realizado una serie de simulaciones con el que se han obtenido las siguientes conclusiones:

Se ha desarrollado un modelo dinámico de un sistema RFH útil para los estudios de control y rendimiento operativo desarrollado. Se ha demostrado que la regulación de la temperatura de los sistemas RFH puede mejorarse significativamente en comparación con los sistemas existentes actuales de control on/off.

El control multietapa elimina el uso del sensor de temperatura de la losa del suelo.

El ACGC sigue la consigna de temperatura de la zona mucho más de cerca que el control proporcional.

Se han desarrollado directrices para la selección de los parámetros de ajuste P y K . Un buen control de la temperatura.

Los resultados muestran que, en climas más fríos, los edificios con mayor capacidad térmica pueden lograr un mejor rendimiento de control utilizando valores de ganancia más altos para el controlador.

3. *Floor heating pre-on/off parameters based on Model Predictive Control feature extrapolation.* [8]

Los sistemas de calefacción por suelo radiante se caracterizan por una inercia térmica relativamente alta, por lo que reaccionan lentamente a los cambios de consigna. Cuando el sistema se enciende, puede

producirse un periodo de subcalentamiento durante un periodo relativamente largo, y viceversa, cuando se reduce el valor de consigna, la inercia térmica del suelo puede provocar un sobrecalentamiento. En las aplicaciones residenciales, los usuarios intentan evitar estos problemas de incomodidad utilizando un punto de consigna constante, más alto que el de retroceso. De este modo, aumenta el consumo medio de energía y la factura del usuario. Una solución más inteligente para mitigar este problema es incluir un parámetro de periodo de preencendido, de forma que el sistema se encienda un tiempo determinado antes del aumento de la consigna para evitar el periodo de subcalentamiento y un periodo de predesconexión para que se apague antes del sobrecalentamiento. Los controladores predictivos pueden ser una solución para compensar la lentitud de respuesta del sistema de suelo radiante. Sin embargo, además de la necesidad de más datos, la potencia de cálculo va más allá de la disponible en los microcontroladores de los sistemas de calefacción para casos residenciales. Para evitar estos problemas, en este trabajo se utiliza la trayectoria de control óptima obtenida mediante un enfoque de Control Predictivo de Modelos (MPC) para identificar los parámetros de preactivación y predesactivación que deben actualizarse periódicamente en el microcontrolador (por ejemplo, mensualmente). Se ha realizado un trabajo de simulación para comparar el rendimiento entre un controlador basado en reglas (RBC) de referencia, un RBC mejorado y un MPC en términos de confort y uso de energía. El resultado es una reducción de una media de $1,1^{\circ}\text{C}$ a $0,2^{\circ}\text{C}$ para la peor zona térmica, lo que significa una reducción del 80% de las molestias con respecto a la línea de base y un ligero aumento del consumo eléctrico de la bomba de calor (menos del 5%).

4. *Effects of controls and floor construction of radiant floor heating Systems for residential application with high variability of solar gains.* [9]

En este trabajo se analizan varios controladores reactivos y predictivos, con y sin retroceso, y la construcción del suelo, para la calefacción por suelo radiante en una vivienda unifamiliar en un clima frío, con alta variabilidad en las ganancias solares. Se evaluó la energía de calefacción del suelo y el confort de los ocupantes. La modelización demostró que, en general, los suelos de menor masa térmica funcionaban mejor en los casos de menor variabilidad de las ganancias solares (menor superficie de acristalamiento orientada al sur). En el caso de una alta variabilidad de las ganancias solares, los suelos con mayor masa tendían a proporcionar un mayor confort, siempre que los tubos estuvieran situados cerca de la superficie del suelo. En general, la reducción de la temperatura proporcionó un modesto ahorro de energía en calefacción y redujo los periodos de sobrecalentamiento. Los reguladores proporcionales, integrales y derivativos (PID) y el reajuste de la temperatura exterior con retroalimentación de la temperatura interior fueron los que mejor funcionaron en todos los casos. Se comprobó que una selección adecuada del regulador y de la construcción del suelo puede suponer una diferencia en la demanda de energía de calefacción de hasta un 25%.

5. *An optimal predictive control strategy for radiant floor district heating Systems: Simulation and experimental study.* [10]

Se realizó un estudio para evaluar el rendimiento energético de una estrategia de control predictivo óptimo para sistemas de calefacción urbana por suelo radiante. Se desarrolló un modelo de sistema de calefacción por suelo radiante de cuatro zonas.

Se estudió el rendimiento simulado de la estrategia de control predictivo óptimo. Los resultados mostraron un 10% de ahorro energético en comparación con una estrategia de control proporcional-integral (PI). Los experimentos se realizaron en una instalación de prueba de un sistema de calefacción urbana por suelo radiante en un laboratorio. La descripción de la instalación de prueba, sus condiciones de funcionamiento y los resultados obtenidos.

La estrategia de control predictivo óptimo, por su sencillez y eficiencia energética, es un buen candidato para el control de sistemas de calefacción por suelo radiante.

Aplicación práctica: La eficiencia energética es un tema de gran interés en el diseño y funcionamiento de sistemas de calefacción sostenibles. Los sistemas de calefacción urbana por suelo radiante se han instalado y explotado con éxito en muchos países, lo que ha supuesto un importante ahorro de energía. La estrategia de control predictivo óptimo propuesta en este estudio aumenta el potencial de ahorro energético de los

sistemas de calefacción urbana. La estrategia de control óptimo es sencilla de aplicar, ya que se basa en la temperatura del aire exterior y calcula los futuros valores de consigna para la temperatura del agua de la caldera.

Un controlador proporcional-integral (PI) convenientemente ajustado puede utilizarse para seguir el punto de consigna óptimo y conseguir así ahorro potencial de energía. Un controlador lógico programable o un sistema de control supervisor sería para implementar la estrategia de control óptimo diseñada. El control local puede realizarse utilizando controladores industriales de retroalimentación PI.

4.¿QUÉ SE HA PROPUESTO?

Este proyecto surge de la propuesta realizada por UPONOR al departamento de Ingeniería Energética de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de una Universidad de Sevilla, de comprobar y desarrollar una herramienta que validara y mejorara el sistema de control de domótica KNX de la propia empresa, suministrando todos los equipos anteriormente nombrados junto con el sistema de control.

Para ello, inicialmente se buscó información sobre el sistema de KNX con el que la empresa trabaja. De forma alternativa, se han realizado numerosos experimentos para encontrar el paso previo al control del sistema de suelo radiante en la sala de experimentación para facilitar la implementación de una forma eficiente y sencilla.

Dicho paso previo ha sido la implementación de un sistema predictivo de parámetros térmicos que influyen en el edificio con el funcionamiento del suelo radiante y los demás equipos. Este sistema se ha basado en balances térmicos y estudio de las variables climatológicas externas al edificio. A diferencia de sistemas de predicción de redes neuronales, se ha conseguido con un intervalo relativamente corto de tiempo y con menos ecuaciones matemáticas el desarrollo de las Líneas Base que permiten conocer el comportamiento térmico de la sala con el funcionamiento de los equipos.

Con este sistema de predicción, se permitirá realizar toma de decisiones en cuanto al confort térmico de la habitación, por ejemplo, en función del número de ocupantes y las condiciones térmicas exteriores al edificio.

Con el desarrollo completo del acople entre el edificio y el funcionamiento del suelo radiante, se habrá conseguido el símil de Gemelo Digital que se contextualizaba en la introducción; una réplica digital del comportamiento de la sala con la que poder tomar decisiones de control que afecten directamente al confort humano.

5. CONCLUSIONES

En este último punto, se procede a resumir algunas conclusiones a las que se han llegado a partir de la realización del proyecto.

En primer lugar, subrayar la importancia del desarrollo de tecnologías especificadas en el primer capítulo, como el Digital Twin, Machine Learning y BIM. A partir del estudio en profundidad de dichas tecnologías se podrán realizar importantes avances para la automatización de los procesos y el conocimiento de futuros comportamientos de un sujeto físico de estudio. En concreto, cabe destacar en este proyecto la implementación de nuevos métodos de Gemelos Digitales en la edificación, y en especial, al estudio del confort térmico. Se podrán realizar modelos que alcancen un sistema predictivo del espacio ocupado, teniendo en cuenta la ocupación, los equipos que se encuentren en este, y las condiciones meteorológicas exteriores para alcanzar el máximo bienestar térmico en el interior. Destacar que el trabajo desarrollado es muy similar al concepto de Gemelo Digital, al tener un sujeto de estudio físico, en este caso es el edificio, con el que poder reproducirlo de forma remota y poder obtener un sistema predictivo de la temperatura del aire en el interior del recinto y realizar el control térmico oportuno.

Por un lado, mediante la realización de las funciones de transferencia experimentales (obtención de las líneas bases) desarrolladas se ha podido establecer un sistema predictivo del edificio de estudio en un periodo de tiempo relativamente corto respecto a otros sistemas de predicción, como las redes neuronales, en las cuales es necesaria la implementación de una gran cantidad de ecuaciones en un mayor periodo de tiempo.

Al realizar la caracterización del edificio mediante las LBP y la LBS con el funcionamiento del split, sin tener en cuenta la inercia del edificio, se han implementado controladores típicos (proporcional, integral, derivativo, proporcional-derivativo, proporcional-integral y, por último, proporcional-integral-derivativo) donde se ha llegado a la conclusión, de que el controlador que controla mejor en el caso de estudio es el PI, al responder de forma más rápida y sin el efecto de las sobreoscilaciones producidos por la acción derivativa de los controladores comparados.

Por otro lado, mediante el desarrollo del acople del suelo radiante instalado y el recinto, se ha realizado una LBT en la que se obtiene la temperatura del aire en función del calor aportado del suelo al aire. En la función de transferencia, se produce un gran amortiguamiento durante el arranque y alcanza el valor de consigna en un largo periodo de tiempo. Para futuros proyectos, se propone indagar en el desarrollo de dicha función de transferencia experimental para resolver el problema encontrado.

Finalmente, a partir de la bibliografía, se ha proporcionado información acerca de nuevos métodos y estrategias de control del suelo radiante en edificios para sistemas tanto de calefacción como de refrigeración con distintos softwares.

Se propone para futuros proyectos, la implementación de nuevos sistemas de control de suelo radiante encontrados en la bibliografía. Además, incluir en el funcionamiento del sistema instalado en la celda de experimentación, el tanque de almacenamiento con el que poder establecer un sistema de control que modifique el funcionamiento de on/off de las válvulas entregado por el sistema de control de UPONOR.

Bibliografía

- [1] Willi, Sara. “*Room Temperature Sensors in the Digital Twin*”. Tesis. 2020.
- [2] Clausen, Anders; Arendt, Krzystof; Johnsen, Aslak; Sangogboye, Fisayo Caleb; Kjaergaard, Mikkel Baun; Veje, Christian T. y Jorgensen Norregaard. “*A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and comercial buildings*”. Artículo. Mayo, 2021.
- [3] Molddesaether, Ragnhild Eilertsen. “*Digital Twin for Industrial Induction Heating Equipment*”. Tesis de Máster. 2021.
- [4] Nytsch-Geusen, Christoph; Kaul, Werner; Radler, Jorg; Westermann, Lucas; Shenoy, Vishvesh y Balekai, Pruthviraj. “*The Digital Twin as a Base for the Design of Building Control Strategies*”. Artículo. 2019.
- [5] Shahinmoghadam, Mehrzad; Motamedi, Ali y Cheriet, Mohamed. “*Applying Machine Learning and Digital Twinning for the Live Assessment of Thermal Comfort in Buildings*”. Artículo. Octubre, 2021.
- [6] Lee, Kyu-Nam; Lim, Jae-Han; Jin, Wu-Feng; Yeo, Myoung-Souk y Kim, Kwang-Woo. “*The Control Methods for Radiant Floor Heating in High-Rise Residential Building*”. Artículo. 2004.
- [7] Uddin, M. Zaheer; Zhang, Z.L. y Cho, S.H.. “*Augmented control strategies for radiant floor heating systems*”. Artículo. 2002.
- [8] Zanetti, Ettore; Alesci, Rossella; Scoccia, Rossano y Aprile, Marcello. “*Floor heating pre-on/off parameters base don Model Predictive Control feature extrapolation*”. Artículo. 2022.
- [9] Brideau, Sébastien. “*Effects of controls and floor construction of radiant floor heating Systems for residential application with high variability of solar gains*”. Artículo. 2020.
- [10] Cho, S. Hwan; Hong, Seong-Hi; Li, Song-Chun y Zaheeruddin, M.. “*An optimal predictive control strategy for radiant floor district heating systems: Simulation and experimental study*”. Artículo. 2016.