



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Grado en Ingeniería eléctrica**

**ESTUDIO ENERGÉTICO DE UN RECUPERADOR DE
ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO
UNIVERSITARIO**

Autor:

Vegas Barbado, Sandra

Tutor:

Rey Martínez , Francisco Javier

**Dpto. Ingeniería energética y
Fluidomecánica**

Cotutor:

Manuel Andrés Chicote

**Dpto. Ingeniería energética y
Fluidomecánica**

Valladolid, julio 2016.



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario



Agradecimientos

A mi tutor, Javier Rey, por ofrecerme la oportunidad de realizar este Trabajo Fin de Grado en su departamento, por su tiempo y dedicación ofrecidos.

A mi cotutor, Manuel Andrés, por su gran ayuda, tiempo y entrega aportado en la realización de este trabajo.

A todos los miembros del departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, por el trato recibido durante estos meses.

A mis padres, por su apoyo, comprensión y cariño incondicional durante estos años y por darme la oportunidad de poder realizar estos estudios.

A mis hermanos, por estar siempre a mi lado.

A mis “Jueves de Ingenieras” y a los amigos que conocí en clase y que hoy forman parte de mi familia, por todo lo que hemos vivido. Sin vosotros no hubiera sido lo mismo.

Muchas gracias.



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario





Resumen

Este trabajo documenta el estudio de investigación energético de un intercambiador tierra-aire. Este sistema innovador aclimata el aire exterior de forma natural antes de introducirlo en la instalación de ventilación asegurando unas condiciones de confort adecuadas para el edificio.

Los trabajos realizados incluyen el análisis de monitorización de un edificio universitario real equipado con el sistema de pozos canadienses, un estudio del comportamiento del modelo matemático implementado en el entorno de simulación TRNSYS, y el desarrollo de diversas simulaciones en distintas áreas climáticas de la geografía española para estimar el potencial de aprovechamiento del sistema.

La comparativa de los resultados del modelo y las medidas experimentales muestran tendencias satisfactorias susceptibles, no obstante, de mejoras futuras. Las simulaciones en distintos climas estiman ahorros energéticos entre el 70% y el 90% de la demanda térmica anual de ventilación, lo que representa una opción muy interesante para el preacondicionamiento del aire de ventilación.

Palabras clave

Recuperación de calor geotérmica, intercambiador de calor enterrado, pozos canadienses, monitorización energética, modelado TRNSYS.



Abstract

This work documents the energy research on a Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHX). This innovative system naturally treats the outside air before it is introduced in the ventilation facility of the building contributing to ensure indoor comfort conditions.

The performed tasks include the monitoring analysis of a real university building equipped with 'canadian wells', the study of the mathematical model implemented in the TRNSYS simulation environment, and the development of several simulations in different climatic areas of the Spanish geography in order to estimate the system's potential of exploitation.

A comparison between model results and experimental measured values shows satisfactory trends, however, they are susceptible of future improvements. The simulations performed in different climates estimate energy savings between 70% and 90% of the annual total energy demand for ventilation, which represents a very interesting option for the pre-conditioning of the ventilation air.

Keywords

Geothermal energy recovery, underground heat exchanger, Canadian well system, monitoring, TRNSYS modelling.



Índice de contenidos

Capítulo 1. Fundamento teórico	14
1.1. El uso de la energía en los edificios	16
1.1.1. Problemática energética actual.....	17
1.1.2. Situación del sector de la edificación.....	24
1.1.3. Reducción de la demanda de energía.....	31
1.1.4. Aprovechamiento de fuentes de energía alternativas	36
1.1.5. Eficiencia energética de sistemas y procesos.....	39
1.2. Intercambiadores de calor tierra-aire (EAHX)	42
1.2.1. Origen y desarrollo.....	42
1.2.2. Campo de aplicación	44
1.2.3. Principio de funcionamiento.....	45
1.2.4. Marco legal	46
Capítulo 2. Caso de estudio: El edificio LUCIA.....	48
2.1. Introducción.....	50
2.2. Datos generales del sistema EAHX del edificio LUCIA	54
Capítulo 3. Análisis de medidas experimentales.....	60
3.1. Análisis del comportamiento general del sistema	62
3.1.1. Funcionamiento en periodo de INVIERNO.....	62
3.1.2. Funcionamiento en periodo de VERANO	66
3.2. Toma de medidas específicas de caudal	69
Capítulo 4. Modelado del sistema.....	80
4.1. TRNSYS como herramienta de simulación.....	82
4.2. Modelo de un intercambiador de calor enterrado horizontal	83
4.3. Planteamiento del modelo general en TRNSYS Studio.....	87
4.4. Análisis preliminar de sensibilidad del modelo.....	89
4.5. Comparación de resultados medidos y simulados	95
Capítulo 5. Simulación de un sistema EAHX en la climatología española	100
5.1. Planteamiento del estudio de simulación	102
5.2. Resultados y discusión	106
Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros	110
6.1. Conclusiones	112



6.2. Trabajos futuros.....	113
Referencias.....	116



Índice de figuras

Figura 1. Posición de los países en 2011 respecto del protocolo de Kioto....	16
Figura 2. Suministro mundial de energía primaria (Mtoe) por fuente energética.	18
Figura 3. Suministro mundial total de energía primaria (Mtoe) por región.....	18
Figura 4. Previsión a 2035 del suministro total de energía primaria (Mtoe) por fuente energética según dos escenarios: NPSy 450S	19
Figura 5. Evolución del precio del barril en \$.....	21
Figura 6. Emisiones de CO ₂ (MtCO ₂) mundiales por región.	23
Figura 7. Distribución del consumo final de recursos energéticos por sectores económicos en 2011 en países desarrollados y en países emergentes.....	25
Figura 8. Distribución del consumo final de recursos energéticos por sectores económicos en 1990 y 2010 en la UE.....	26
Figura 9. a) Consumo de energía (Mtoe) por usos finales en el sector residencial de la UE en 2000 y 2011. b) Repartición porcentual del mismo en 2011	27
Figura 10. Alternativas para reducir el consumo energético en el sector de la edificación.....	29
Figura 11. Ejemplo de la variación de los costes de ciclo de vida y de los costes de aislamiento en función del espesor de aislante.	33
Figura 12. Dos ejemplos de diseño arquitectónico con elementos pasivos de sombra integrados: edificio LUCIA en Valladolid [11] (izquierda) y edificio sede de IDOM Bilbao [12](derecha).....	34
Figura 13. Diversos ejemplos y esquemas de conceptos de enfriamiento pasivo utilizando el aire ambiente o el terreno como sumidero de calor: a) y b) intercambiadores tierra-aire del edificio LUCIA, c) estrategia de ventilación nocturna.....	35
Figura 14. Sistemas BIPV integrados en los tejados inclinados de un grupo de viviendas (izquierda) y en una cubierta transparente de un edificio no residencial (derecha)	37
Figura 14. Ejemplos de sistemas de acumulación de energía térmica sensible en edificios: depósitos de inercia tradicionales (a) y sistema TABS (b)	40
Figura 16. Distintos esquemas de equipos recuperadores de calor: a) de placas, b) rotativo y c) tipo 'heat-pipes'[15]	41
Figura 17. Imagen del Castillo de Predjamski, Postojna, Eslovenia [16].....	43
Figura 32. Esquema de flujos de aire que atraviesan la UTA.	57



Figura 33. Esquema de flujos de aire que atraviesan la UTA con sistemas de monitorización.	58
Figura 34. Resultados de la monitorización en periodo de invierno (enero 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador.....	64
Figura 35. Resultados de la monitorización en periodo de invierno (febrero 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador.....	65
Figura 36. Resultados de la monitorización en periodo de verano (julio 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador	67
Figura 37. Resultados de la monitorización en periodo de verano (agosto 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador.....	68
Figura 38. Detalle de las evoluciones de temperatura y apertura de compuertas en una semana tipo del mes de agosto 2016.....	69
Figura 39. Equipo utilizado para la medida de caudales de aire.....	69
Figura 40. Esquema de principio general de la instalación de ventilación (Edificio LUCIA).....	71
Figura 41. Localización de las perforaciones realizadas en los conductos de aire para la toma de medidas de caudal.....	72
Figura 42. Localización de los puntos de medida con el Pitot en el conducto de aire exterior (posición 1).....	74
Figura 43. Localización de los puntos de medida con el Pitot en el conducto de aire de mezcla (posición 2).....	74
Figura 44. Caudales de aire medidos con la compuerta del sistema EAHX cerrada (0%) en la posición 1 (a) y en la posición 2 (b).	75
Figura 45. Caudales de aire medidos en el conducto OA (pos.1) con la compuerta del sistema EAHX abierta (100%) y distintos regímenes del ventilador	76
Figura 46. Caudales de aire medidos en el conducto de aire de mezcla (pos.2) con la compuerta del sistema EAHX abierta (100%) y distintos regímenes del ventilador	78
Figura 47. Ejemplo de una posible configuración de los tubos del intercambiador de calor enterrado de tubos horizontales.....	83
Figura 48. Planteamiento general del dominio de cálculo del modelo.....	86



Figura 49. Vista en planta de malla nodo de dos capas, intercambiador de calor con cuatro tubos con aislamiento perímetro vertical frontal y parte trasera.....	87
Figura 50. Ejemplo de modelo generado en TRNSYS Studio	88
Figura 51. Evolución de la temperatura de salida de los pozos calculada desde su valor inicial en función de la temperatura real del aire a la entrada en los casos B y D.....	91
Figura 52. Modelo general en TRNSYS Studio definido para la comparación de resultados medidos y simulados	95
Figura 53. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Julio de 2015.....	96
Figura 54. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Agosto de 2015	97
Figura 55. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Enero de 2016.....	98
Figura 56. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Febrero de 2016.....	98
Figura 57. Vista general de los resultados derivados de las simulaciones en distintas zonas climáticas.....	102
Figura 58. Mapa nacional de zonas climáticas	104
Figura 59. Vista general de los resultados derivados de las simulaciones en distintas zonas climáticas: a) B4, b) C1, c) C2 y d) D2.....	106
Figura 60. Vista ampliada de los resultados de simulación. Ejemplo: Zona B4	106
Figura 61. Carga de ventilación con y sin sistema EAHX para las 4 zonas climáticas: B4 (a), C1 (b), C2 (c) y D2 (d).....	108



Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas del caudalímetro Fluke 922	70
Tabla 2. Condiciones de operación (casos) para la medida de los caudales de aire	73
Tabla 3. Medidas de caudal (m ³ /h) en el conducto de aire exterior (posición 1)	77
Tabla 4. Medidas de caudal (m ³ /h) en el conducto de aire exterior (posición 2)	78
Tabla 5. Parámetros principales.....	88
Tabla 5 (cont.). Parámetros principales	89
Tabla 6. Planteamiento del estudio paramétrico de sensibilidad del modelo	91
Tabla 7. Planteamiento de las distintas simulaciones.....	92
-	103
-	103
Tabla 8. Propiedades físicas del subsuelo	104
Tabla 9. Resultados de ahorro energía térmica derivados de las simulaciones	107



Introducción y objetivos.

En la actualidad, el desarrollo de la sociedad se encuentra enmarcado en un contexto determinado por dos aspectos fundamentales enfrentados. Por un lado, la sociedad moderna tiende a un incremento del grado de bienestar de sus individuos, con el aumento del consumo energético que esta exigencia lleva intrínsecamente asociado, mientras que por otro lado, debe hacer frente a una manifestada situación de crisis energética y económica, sin olvidar tampoco el cumplimiento de una serie de requisitos y estándares de sostenibilidad ambiental.

Un ejemplo concreto de este hecho se ve claramente expuesto en las instalaciones de climatización de nuestros edificios. El incremento en las exigencias sobre calidad de aire interior precisa aumentar los caudales de aire de ventilación y, por tanto, la inversión energética en la adecuación higrotérmica de este aire.

Por estas razones, de cara a la consecución de un desarrollo social sostenible se deben buscar soluciones a estos problemas. Con objeto de potenciar y fomentar el uso más racional de la energía en instalaciones térmicas de los edificios, normalmente destinadas a proporcionar de forma segura y eficiente los servicios de climatización necesarios para atender los requisitos de bienestar térmico y de calidad del aire interior, hay que incorporar nuevos avances técnicos compatibles con las exigencias energéticas y medioambientales actuales, mejorando el rendimiento de los equipos y de los sistemas empleados.

Existen diferentes vías para conseguir un ahorro de energía en los edificios entre las que destacan fundamentalmente las siguientes:

- i) Disminución de la demanda energética.
- ii) Sustitución de las fuentes de energía convencionales por energías renovables (solar térmica, fotovoltaica, biomasa o geotérmica).
- iii) Utilización de sistemas y equipos térmicos más eficientes.
- iv) Recuperación de energía residual y aprovechamiento del enfriamiento gratuito.

De entre estas vías, el trabajo aquí presentado se centra en los dos últimos puntos, abordando un estudio de ahorro energético a partir de la aplicación de equipos eficientes como son los sistemas de recuperación de energía geotérmica en instalaciones de ventilación aplicándolo a un edificio universitario.

Las prestaciones de este tipo de sistemas dependen de muchos factores y en su evaluación han de tenerse muy en cuenta las condiciones concretas de



trabajo en cada caso. Fundamentalmente se deberán valorar aspectos como las condiciones climatológicas de la zona o las características geotécnicas del terreno.

Por esta razón en un análisis de las posibilidades de ahorro de estos sistemas resulta de gran importancia la realización de simulaciones energéticas de las diferentes combinaciones, tanto para estimar de forma mucho más precisa las necesidades reales del edificio como para valorar adecuadamente las prestaciones reales de los equipos.

Basándonos en el principio de funcionamiento de estos sistemas (intercambiadores de calor tierra-aire), se explicará la metodología a seguir para la creación de diferentes modelos de simulación con el software TRNSYS (*Transient Energy System Simulation Tool*), el cual ofrece una herramienta muy potente y versátil capaz de simular el comportamiento de infinidad de sistemas energéticos bajo muy distintas condiciones de operación.

Así, bajo todo este contexto, y como inicio de un trabajo de investigación, el objetivo principal que se pretende conseguir con la realización de este Trabajo Fin de Grado es proporcionar información sobre el sistema propuesto, así como su funcionamiento teórico y su caracterización experimental, obteniendo resultados y conclusiones de un análisis de ahorro energético mediante la simulación con TRNSYS de distintos modelos basados en el sistema de recuperación de energía geotérmica a través de un intercambiador de calor tierra-aire. Para ello se definirán una serie de condiciones determinadas de operación de los equipos analizando comparativamente sus prestaciones en las distintas áreas climatológicas de la geografía española.



Capítulo 1. Fundamento teórico



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario



1.1. El uso de la energía en los edificios

Actualmente existe un gran deterioro de la capa de ozono, consecuencia principalmente de las emisiones de CO₂. Estas emisiones tienen lugar debido a la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía. Ante tal situación, se hace obligatoria la necesidad de conseguir una reducción de la demanda energética con la que poder hacer frente a una serie de normativas relativas al consumo de energía, reflejadas en el Código Técnico o el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)[1], así como poder contribuir al cumplimiento del protocolo de Kyoto (2005) sobre el cambio climático, protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y su acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global, entre ellos principalmente el dióxido de carbono[2].

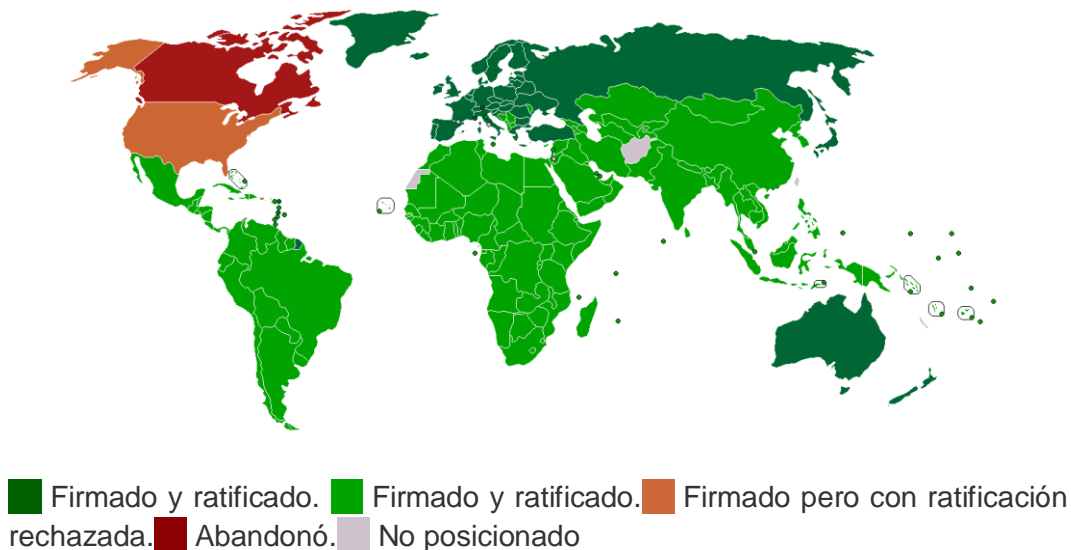


Figura 1. Posición de los países en 2011 respecto del protocolo de Kioto

De igual manera, las instalaciones en las que vivimos o desempeñamos cualquier actividad, deben tener unas condiciones adecuadas de calidad del ambiente interior (contaminantes, condiciones higrotérmicas, iluminación, ruido y ergonomía). Estas condiciones vienen impuestas tanto por la legislación aplicable como por el aumento de la calidad exigido por los ocupantes.

Para hacer frente a esta demanda energética existen diversas alternativas de climatización altamente eficientes, entre las cuales en este trabajo se aborda la recuperación de energía geotérmica a través de intercambiadores de calor tierra-aire. En este capítulo se presenta un repaso del Estado del Arte de dicha tecnología. Las técnicas de enfriamiento evaporativo y la recuperación



de energía residual del aire de expulsión son otras opciones, complementarias a la anterior, pero su explicación y caracterización queda fuera del objetivo del presente Trabajo Fin de Grado.

1.1.1. Problemática energética actual

A lo largo de la historia la dependencia de la energía se ha venido imponiendo progresivamente hasta llegar al punto de convertirse en un bien indispensable para la actividad económica y social mundial en los últimos siglos. Esta necesidad obligada de la energía trae consigo una preocupación humana: asegurar la continuidad de la misma.

La energía es una de las principales bases sobre las que se sustenta la sociedad actual. Su disponibilidad a bajo coste desde la época de la Revolución Industrial ha permitido un desarrollo tecnológico y una mejora del bienestar social en los países desarrollados sin precedentes en toda la historia de la humanidad. Sin embargo, los recursos energéticos que han soportado esta evolución (principalmente los combustibles de origen fósil) han sufrido un incremento de demanda que ha traído consigo el agotamiento de los recursos naturales y su posterior regeneración. Esta realidad, hace que en la actualidad, y ya desde hace varios años, haya surgido una preocupación creciente acerca de una problemática de carácter energética, socio-económica y medioambiental. En este sentido, son tres los aspectos que merecen ser comentados como marco general del presente trabajo: la escasez de los recursos energéticos, el incremento de los precios de la energía y el deterioro del medioambiente.

1. La escasez de los recursos energéticos

El funcionamiento de la economía mundial se basa en el consumo de energía. Sin ella sería imposible extraer las materias primas necesarias, ni hacer funcionar el sistema productivo para generar los bienes y servicios que la sociedad necesita, tampoco su transporte ni el de las personas. Gracias a disponer de un suministro adecuado y suficiente de energía las sociedades desarrolladas disfrutaban de un elevado nivel de bienestar.

En principio parece evidente establecer una correlación entre consumo energético y nivel de vida: los países más ricos, fuertemente industrializados y urbanizados, con importantes sistemas de transporte y una fuerte mecanización, consumen cantidades muy superiores de energía per cápita, mientras que los más pobres con economías a veces de mera subsistencia se limitan a actividades primarias y artesanales y tienen un escaso desarrollo industrial, lo que se traduce en un bajo consumo energético.



Dada la evolución creciente en el suministro mundial de fuentes de energía primaria a lo largo de las últimas décadas (Figuras 2 y 3) según datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [3], en 2011 se alcanzaron cifras que aproximadamente duplicaban los valores de hace 25 años. Además, a lo largo de este tiempo, las fuentes de origen fósil (petróleo, carbón y gas natural) han constituido el soporte fundamental del desarrollo cubriendo un porcentaje próximo al 80 % del total de energía primaria suministrada (Figura 2). Por tanto, estos datos muestran un ritmo insostenible en la utilización de unos recursos energéticos finitos, que en caso de mantenerse derivarían en un rápido agotamiento de los mismos.

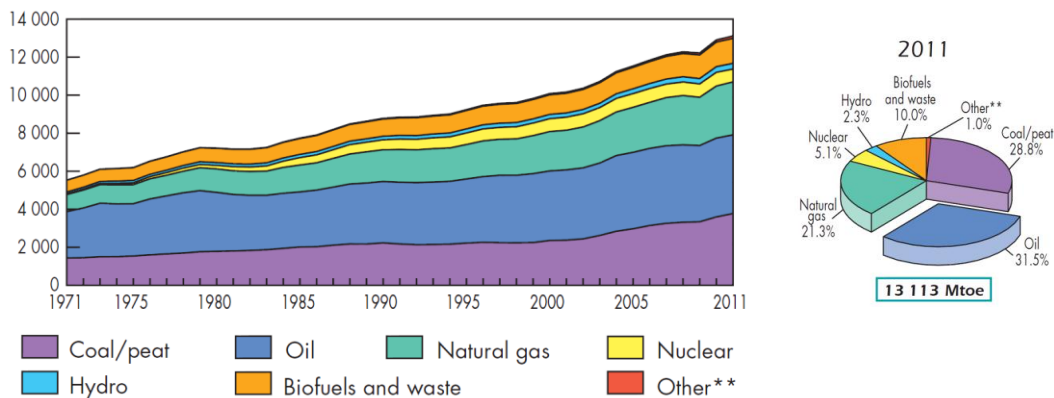


Figura 2. Suministro mundial de energía primaria (Mtoe) por fuente energética.

A la vista de la Figura 3, se aprecia sin embargo, que esta tendencia no es uniforme atendiendo a la zona geográfica analizada. La utilización de recursos energéticos en países de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) [4], mayoritariamente con un grado importante de desarrollo ya alcanzado, ha sido más contenida en los últimos 40 años. Por su parte, las llamadas 'economías emergentes' de países de Asia y América altamente poblados y en vías de desarrollo- encabezados por China, India o Brasil - han experimentado un incremento desmesurado en su consumo energético, especialmente en la última década.

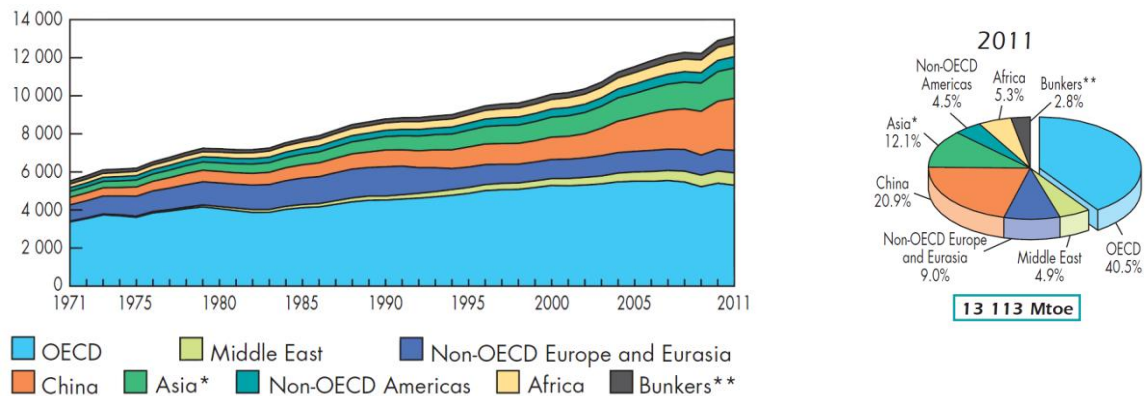


Figura 3. Suministro mundial total de energía primaria (Mtoe) por región.



Esta situación de sobreexplotación de unos recursos escasos, pone de actualidad la teoría del ‘pico del petróleo’ [5] iniciada a partir de los estudios de M. K. Hubbert (1956). En ellos se postula la existencia de un máximo en la tasa de extracción de cualquier explotación petrolífera de acuerdo a una curva de distribución normal. Así, este geofísico norteamericano predijo con 15 años de antelación el pico en la producción de los pozos petrolíferos de Estados Unidos a principios de la década de 1970 y estimó el pico de la producción mundial para finales del siglo XX.

La fecha exacta en la que este hito se haya producido o se vaya a producir resulta controvertida y complicada de valorar en función de las fuentes que se consulten y de los intereses políticos y económicos que se encuentren tras ellas. Sin embargo, pese a que factores adicionales como el descubrimiento de nuevas reservas o los avances realizados en las tecnologías de extracción permitan ser críticos con las estimaciones de Hubbert, existen evidencias de su relevancia hoy en día y de la importancia de dar respuesta a un suministro decreciente de la base energética de nuestra civilización.

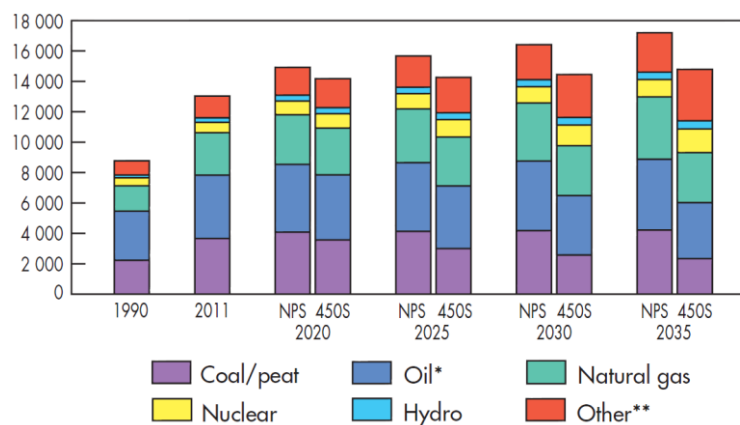


Figura 4. Previsión a 2035 del suministro total de energía primaria (Mtoe) por fuente energética según dos escenarios: NPSy 450S

Así, a raíz de la primera crisis del petróleo, coincidiendo con el pico de los yacimientos estadounidenses en 1971, el mundo desarrollado ha venido concienciándose paulatinamente de este problema y ha ido planteando una serie de actuaciones y políticas en materia energética con el objetivo de afrontar la realidad inexorable del carácter finito de los mencionados recursos fósiles. En este sentido, la Figura 4. muestra las previsiones de la IEA hasta el año 2035 teniendo en cuenta un escenario con la normal aplicación de las políticas energéticas propuestas actualmente (NPS, *New Policies Scenario*), así como un segundo escenario centrado en la aplicación de todas aquellas medidas necesarias para limitar el calentamiento global en 2 °C respecto a la época pre-industrial (450S). En definitiva, la implantación de estas medidas perseguiría avanzar hacia un nuevo modelo de ‘desarrollo sostenible’.



Como siguiente paso, parece necesario especificar cuáles son esas medidas o cuál debe ser la hoja de ruta alternativa que sostenga este desarrollo sostenible. Esta cuestión se abordará con mayor detalle en secciones posteriores de este capítulo.

2. Incremento de los precios de la energía de forma global

Si nos centramos en la evolución del consumo mundial de energía primaria desde el término de la 2ª Guerra mundial, podemos observar como hasta la década de los 70 se produjo un incremento sostenido, satisfecho gracias a aumentos correlativos en la producción energética. Además en este periodo el papel del petróleo fue creciendo en importancia hasta hacerse dominante: en 1971 el petróleo suponía un 49% del total frente a sólo un 29% del carbón. El escenario era entonces el de un fuerte crecimiento económico sostenido por un consumo creciente de petróleo que se suministraba a precios bajos.

Este escenario de precios energéticos bajos tuvo su final con la crisis energética de 1973. Una crisis energética se define como un desajuste temporal entre la oferta y la demanda de energía, lo que genera un inevitable incremento de su precio. Esta crisis tuvo como causa inmediata la decisión de la OPEP, organización que agrupa a una parte fundamental de los países productores de petróleo, de quintuplicar los precios del petróleo en bruto, que paso de 2 a 10 \$.

Como consecuencia de la fuerte subida de los precios del crudo, los países más industrializados, importadores netos, sufrieron una fuerte disminución en el crecimiento económico, un aumento del desempleo y un alza de la inflación que alcanzó tasas de dos dígitos. Igualmente, como consecuencia del encarecimiento de los productos energéticos se produjo en ellos un deterioro en la balanza de pagos con el exterior. Por otro lado los países menos desarrollados, no tardaron en experimentar también las consecuencias, por la contracción que sufrió el comercio internacional y sufrieron un fuerte empobrecimiento y endeudamiento, al tiempo que los países exportadores de petróleo aumentaron de forma muy importante sus ingresos, obteniendo cuantiosos superávits en su balanza de pagos.

La consecuencia más inmediata de la crisis energética en las políticas de los países industrializados fue la toma de conciencia de los gobiernos de la vulnerabilidad de sus economías, excesivamente dependientes del petróleo. Hay que tener en cuenta que las dos terceras partes de las reservas existentes se localizan en Oriente Medio, una de las áreas más calientes del planeta en términos geopolíticos. Todo ello supuso un incentivo para el desarrollo de nuevas políticas más favorables, al menos en teoría, al ahorro, el aumento de la eficiencia energética y la diversificación de las fuentes de abastecimiento, con el fin de reducir la dependencia.



En 1979 la Revolución Islámica en Irán supuso la llegada de un régimen político hostil a Occidente y la desaparición del mercado mundial de 4 millones de barriles diarios. Ello trajo consigo el alza de los precios hasta los 40 \$ por barril. Con la disminución del precio del petróleo que se produjo a mediados de los 80, gracias a la producción de otras áreas como México, Alaska y el Mar del Norte, el consumo de petróleo volvió a una senda de crecimiento pero con tasas más moderadas. Por áreas, se aprecia en este periodo una relativa estabilidad en Europa, frente a un fuerte desplome en los países integrantes de la ex Unión Soviética tras la caída del muro y un fuerte crecimiento en los países de Asia y el Pacífico.

Los sucesivos conflictos que se han ido produciendo en el segundo tercio del siglo XX en Oriente Medio (Guerra del Yom Kippur, Revolución Iraní e invasión de Kuwait) han tenido su correspondencia en un incremento paralelo de los precios del barril de crudo. Sin embargo los efectos de estos acontecimientos han sido moderados en intensidad y duración comparados con el alza sostenida que se viene experimentando en los últimos tiempos. En la actualidad el precio del barril ya supera los 70 \$.

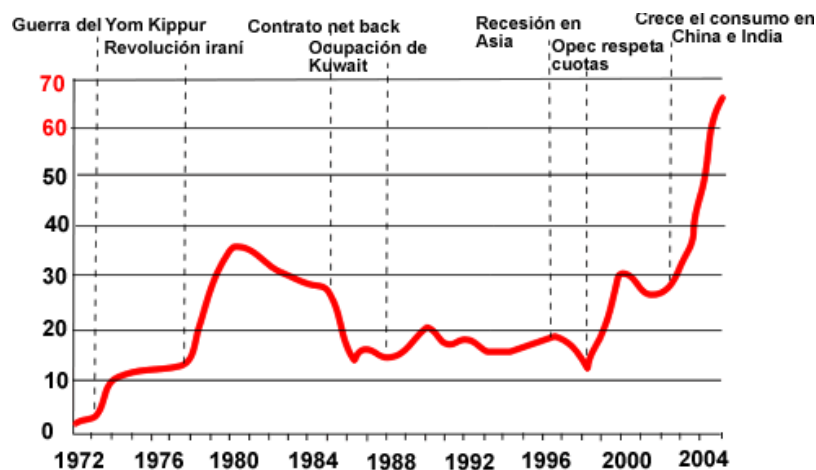


Figura 5. Evolución del precio del barril en \$.

Las fuertes subidas registradas se atribuyen a diferentes causas, algunas de ellas coyunturales como la escalada bélica sufrida en Irak o las revoluciones árabes de los últimos tiempos. Sin embargo no es posible obviar el importante papel que puede jugar a medio y largo plazo el aumento de la demanda en las economías emergentes de Asia, China e India fundamentalmente. Estos países, que no hay que olvidar, suman una tercera parte de los habitantes del globo, están experimentando un fuerte desarrollo en todos los aspectos, que afortunadamente les está llevando a dejar atrás la pobreza en que se encontraban. Lógicamente este desarrollo lleva aparejado el que fracciones cada vez mayores de su población accedan a comodidades que aquí son frecuentes, pero que allí no están en absoluto generalizadas, tales como el



uso de vehículos particulares o algo tan elemental como la electricidad doméstica. Todo ello hace suponer, con todo fundamento un incremento de las demandas energéticas aún mayor en el futuro. Éstas generarán, sin duda, nuevas tensiones en el mercado.

A pesar de que las reservas de petróleo crecieron en los últimos 25 años del siglo XX de 90.000 millones de toneladas a 140.000 y que se han producido grandes avances en las técnicas de exploración y producción de hidrocarburos, muchos expertos albergan serias dudas sobre la posibilidad de que se pueda satisfacer en los próximos años las nuevas demandas a precios accesibles.

Según los estudios de predicción que postuló Hubbert y basándose en las estadísticas, el tiempo le dio la razón. Las causas de su acierto radican, de manera breve, en que el ritmo al que crece la explotación de los yacimientos para cubrir la demanda creciente es superior a aquel en que lo hace la exploración y descubrimiento de nuevas reservas.

En el caso del gas natural y del carbón, la situación es algo mejor, con reservas estimadas de 150 billones de metros cúbicos del primero y suficientes para satisfacer la demanda actual del segundo durante 200 años. Además están muy repartidas por el planeta.

Pero esta situación, de agotamiento de las reservas, lleva a muchos expertos a pronosticar que el modelo energético actual basado en el consumo de combustibles fósiles va a entrar en una fuerte crisis en un futuro no muy lejano, cuando la demanda sobrepase a las posibilidades de la oferta. A ello hay que añadir los gravísimos problemas tratados en el siguiente punto relacionados con el calentamiento global.

En cualquier caso las implicaciones económicas y geopolíticas que se derivarán del fin de este ciclo basado en el petróleo, especialmente cuando empiece a visualizarse con claridad el final, son hoy por hoy una incógnita.

3. Impacto ambiental y cambio climático

Las sociedades humanas generan un importante impacto en el medio ambiente, como resultado de sus actividades. La agricultura, la ganadería y la pesca, la minería, la industria o los servicios son los responsables de lo que la mayoría de las veces se traduce en un grave deterioro.

En este sentido cabe señalar que la producción y el consumo de energía generan efectos que se manifiestan en forma de calentamiento global, contaminación atmosférica, lluvia ácida, contaminación radiactiva o vertidos de hidrocarburos, entre otros, dando lugar a graves afecciones medioambientales. Habitualmente, éstas son contabilizadas en emisiones de CO₂ equivalentes de acuerdo al índice GWP (*Global Warming Potential*) de los



distintos gases de efecto invernadero (GEI- Figura 6) y se toman como indicador principal del potencial daño de la actividad humana sobre el sistema climático.

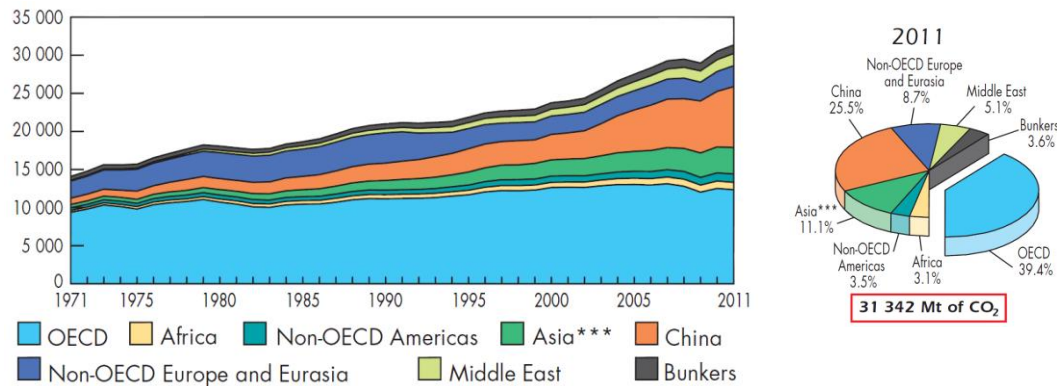


Figura 6. Emisiones de CO₂ (MtCO₂) mundiales por región.

Para evaluar el impacto de las actividades relacionadas con la energía debemos tener en cuenta su ciclo completo y no sólo sus etapas finales. De este modo, no se debe centrar la atención únicamente en el ámbito puramente inmediato de los procesos de producción y consumo, sino que se deben estudiar también las actividades extractivas que determinadas fuentes energéticas requieren, el impacto del transporte previo a su utilización, así como los procesos de tratamiento a que deben someterse antes de ser utilizadas. Igualmente hay que estudiar no sólo los focos de emisión de contaminantes a la atmósfera, hidrosfera y suelos sino que hay que seguirlos hasta su destino final en los ecosistemas, llegando finalmente hasta el hombre. Todo ello considerando que sus efectos son susceptibles de extenderse en el tiempo y el espacio. A este respecto cabe señalar lo que en la actualidad se define como *La huella de carbono* [6], siendo esta la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. Tal impacto ambiental es medido llevando a cabo un inventario de emisiones de GEI o un análisis de ciclo de vida según la tipología de la huella, siguiendo normativas internacionales reconocidas, tales como ISO 14064, PAS 2050 o GHG Protocol entre otras. La huella de carbono se mide en masa de CO₂equivalente. Una vez conocido el tamaño y la huella, es posible implementar una estrategia de reducción y/o compensación de emisiones, a través de diferentes programas, públicos o privados.

Además, esta situación ha conducido a establecer unas limitaciones de los gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, PFC's, HCFC's y SF₆) firmadas en el Protocolo de Kioto, dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Sucesivas conferencias de la ONU sobre el cambio climático derivan en la XIII Cumbre del Clima en Bali en el 2007, y



finalmente en la XV Conferencia sobre el Cambio Climático (Cumbre de Copenhague) en diciembre de 2009, orientada a establecer futuros objetivos para reemplazar los del Protocolo de Kioto, que termina en 2012.

En España las consecuencias derivadas del compromiso de Kioto son delicadas, debido a las emisiones del país. El año base de índice de emisiones del Protocolo de Kioto es 1990. Las emisiones en 2008 superaron en un 40% las establecidas en Kioto. Los incumplimientos de las condiciones establecidas radican en penalizaciones para el país, por lo que se deben encontrar alternativas energéticas, fundamentalmente las energías renovables, que están viendo un aumento considerable en España.

Otro problema para España radica en que, aparte de los gases de efecto invernadero, la combustión de carbón (combustible mayoritario en la península) es el causante de la lluvia ácida. Para hacer frente a este problema se están desarrollando alternativas para su explotación sostenible (gasificación, lavado, purificación, filtrado de humos, etc).

Los compuestos clorados (causantes de la destrucción de la capa de ozono) constituyen otro problema a nivel mundial. A pesar de las normativas destinadas a la supresión de los compuestos fluoro-clorados (CFCs) e hidrógeno-fluoro-clorados (HCFCs) en los sistemas de refrigeración derivadas del Protocolo de Montreal, aún existen equipos en la cadena de frío mundial que trabajan con este tipo de fluidos. A pesar de trabajar en ciclos cerrados, las posibles fugas conducen a riesgos como agentes del efecto invernadero, además del deterioro de la capa de ozono.

Además, en relación a previsiones futuras, sobre la base de los datos científicos existentes, los países desarrollados deberían reducir para 2050 las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80 y un 95 % por debajo de los niveles de 1990, a fin de limitar el cambio climático a un aumento de la temperatura de 2 °C y, de ese modo, evitar efectos climáticos indeseables.

1.1.2. Situación del sector de la edificación

En el análisis del consumo de energía final se distinguen tres grandes sectores económicos: la industria, el transporte y un tercer apartado que engloba al sector primario (agricultura, ganadería y pesca), al sector servicios (oficinas, hostelería, hospitales, educación, etc.) y al sector residencial. La distribución del consumo entre estos sectores presenta evidentes diferencias en función de las áreas geográficas consideradas y de sus condiciones de contorno económicas, culturales, climatológicas, etc. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, la Figura 7 muestra la apariencia de esta repartición en 2011 en áreas desarrolladas, representadas por los países



miembros de la OCDE¹ y en áreas emergentes, representadas por aquellos países no pertenecientes a la OCDE.

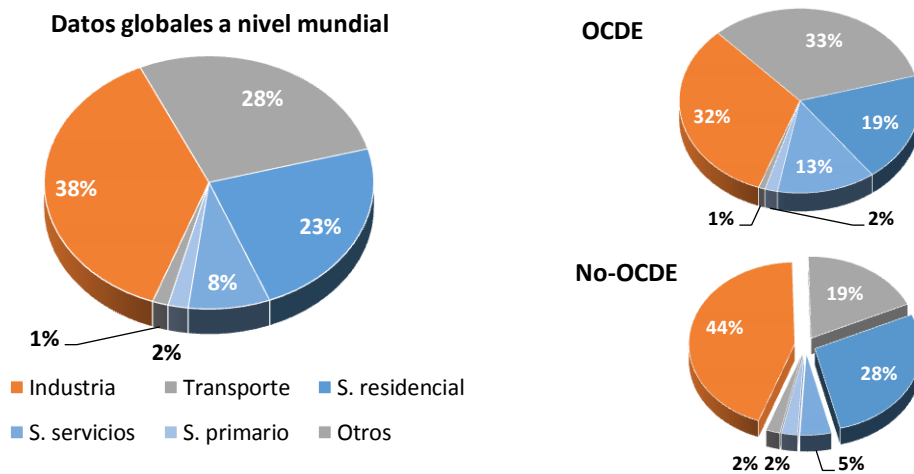


Figura 7. Distribución del consumo final de recursos energéticos por sectores económicos en 2011 en países desarrollados y en países emergentes.

Se aprecian dos perfiles claramente diferenciados. Mientras que en regiones desarrolladas el consumo final de energía está más o menos repartido de forma equitativa entre la industria, el transporte y la edificación (tanto edificios residenciales como del sector servicios), las economías emergentes dedican un mayor porcentaje de los recursos energéticos al motor de su desarrollo (la industria), siendo menores las aportaciones al transporte y al sector servicios con una implantación aún precaria. En cualquier caso, a la vista de estos datos se ha de destacar la importancia del papel que desempeña la edificación como uno de los tres grandes consumidores de energía, pudiendo señalar de forma general, que el consumo de energía final en los edificios supone en torno a un 30 % del total. Además, en los últimos años dicho papel se ha reafirmado como consecuencia del crecimiento demográfico, de la mejora de los servicios y requisitos de bienestar en los edificios, así como del aumento del tiempo que las personas pasan en su vida diaria en ambientes interiores.

En este sentido, y dado el contexto en el que se enmarca el presente trabajo, merece la pena profundizar en la situación concreta del sector de la edificación a nivel de la Unión Europea. El consumo de este sector se ha incrementado en torno a un 1 % anual desde 1990, llegando a representar el 41 % del consumo total de energía final en 2010 (Figura 8).

¹ Son países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) los siguientes: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Chile, Corea, Dinamarca, España, EE.UU., Eslovenia, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Israel, Italia, Japón, Luxemburgo, México, Noruega, N. Zelanda, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, Rep. Checa, Suecia, Suiza y Turquía

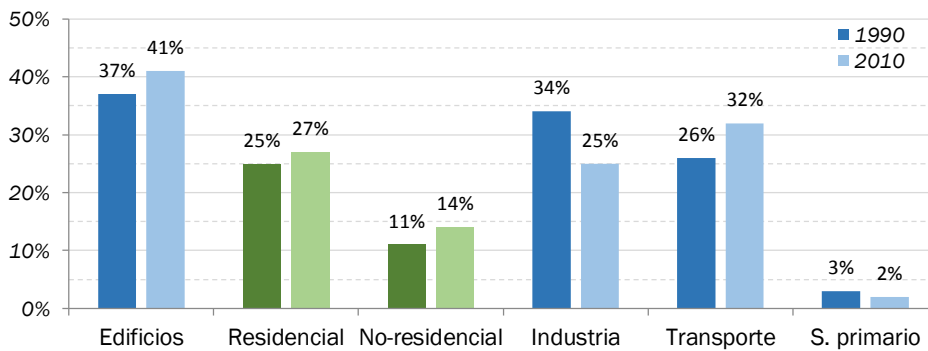


Figura 8. Distribución del consumo final de recursos energéticos por sectores económicos en 1990 y 2010 en la UE.

Por otra parte, la situación en Europa está lejos de ser homogénea. Con cinco países (Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España) aglutinando el 70 % de la superficie total construida, el consumo anual específico por m^2 se encontraba en 2009 alrededor de $220 \text{ kWh}/m^2$, existiendo una notable diferencia entre el ámbito residencial ($200 \text{ kWh}/m^2$) y el terciario ($295 \text{ kWh}/m^2$). Sin embargo, pese a esta variedad, se pueden apuntar algunos aspectos característicos del sector de la edificación de la UE: en el ámbito residencial, la cantidad y el tipo de energía consumida en los edificios residenciales dependen fundamentalmente del clima, el diseño arquitectónico, la infraestructura energética y el nivel económico de sus ocupantes. La demanda en este ámbito deriva de una amplia variedad de usos y servicios, como la provisión de agua caliente sanitaria (ACS), climatización, refrigeración, iluminación, cocina, etc.

La Figura 9 muestra la evolución de la distribución de este consumo por usos finales. A nivel europeo se observa como la calefacción es el uso dominante pese a que en la última década se haya logrado reducir su consumo en unas 24 Mtoe. Esta situación no es tan acusada en países meridionales como España o Italia donde la estación invernal es menos fría. Sin embargo, en estos países el aumento en el número de sistemas domésticos de aire acondicionado (AC) comienza a suponer un incremento anual de la demanda de electricidad, que pueden llegar a producir problemas puntuales de saturación de la red eléctrica en verano. Además, en los próximos años se espera que el consumo global pueda verse incrementado como consecuencia de la implantación creciente de otros equipos asociados a un desarrollo tecnológico y un bienestar cada día más accesibles (electrodomésticos, ordenadores, etc.). De hecho, en la última década ya se ha podido observar esta tendencia ascendente en la energía eléctrica consumida por tales aparatos.

En lo referente a los edificios del sector terciario, el perfil de usos en los que se reparte su consumo de energía es notablemente distinto. La refrigeración y

la iluminación toman una importancia mucho mayor que se ve reflejada en un incremento sustancial del porcentaje asociado al consumo eléctrico. En concreto, este valor alcanzó un 43 % en 2011 en el ámbito de la UE, según se recoge en la figura 9. Además conviene señalar que desde 2008 se ha producido una contracción del consumo energético global del sector a un ritmo de un 1.1 % anual. Sin embargo, los usos eléctricos han continuado creciendo conforme a un 0.9% cada año.

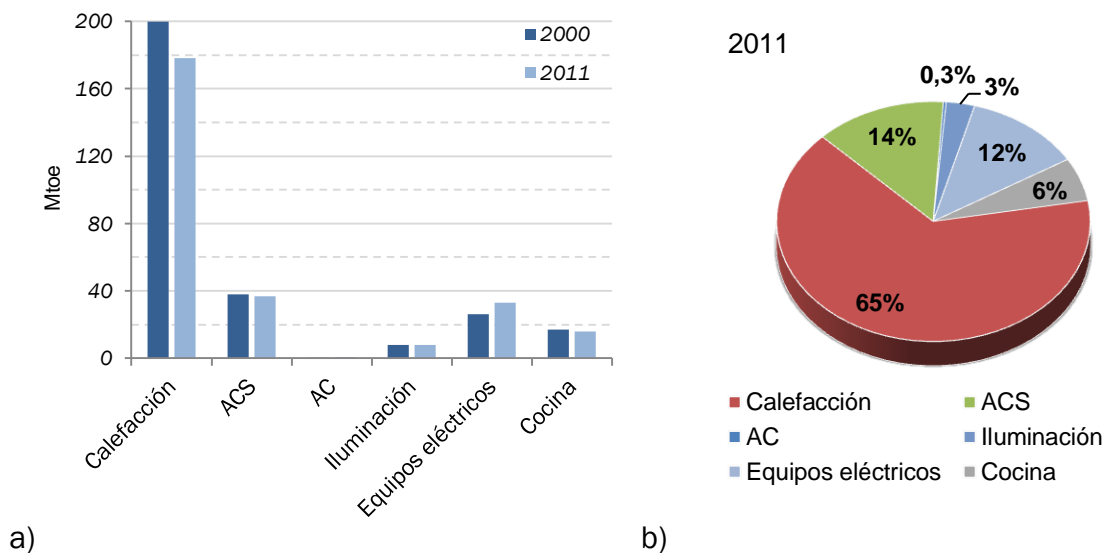


Figura 9. a) Consumo de energía (Mtoe) por usos finales en el sector residencial de la UE en 2000 y 2011. b) Repartición porcentual del mismo en 2011

Esta tendencia hacia la electrificación del sector de la edificación puede favorecer un futuro más sostenible desde el punto de vista medioambiental, siempre que venga acompañada de una apuesta por la electricidad de origen renovable y una importante reducción del uso de combustibles fósiles en la generación. Sin embargo, la sostenibilidad de los edificios no pasa únicamente por este aspecto, sino por el aprovechamiento del importante potencial existente en relación a la reducción de su consumo energético. En este sentido, se estima en un 20 % el margen de ahorro que existe en los edificios respecto al estado actual del sector.

Como se ha señalado, la climatización (calefacción, refrigeración y ventilación) supone un amplio porcentaje en el consumo de energía final en los edificios de la UE, lo cual justifica la necesidad y conveniencia de abordar la mejora en el uso de la energía asociado a estos sistemas. De acuerdo con la figura 10 es posible clasificar las principales acciones capaces de reducir el consumo energético en la edificación bajo tres aspectos diferentes:



1. Reducción de la demanda energética.

El consumo de energía más sencillo de reducir es aquel destinado a cubrir algo que no se necesita. Por ello, se plantea disminuir lo máximo posible la demanda o necesidades energéticas de los edificios. Para lograrlo, se han de tener en cuenta los tres aspectos siguientes:

- Cuidar el diseño y construcción de la envolvente del edificio, con una elección adecuada del aislamiento térmico.
- Involucrar arquitectura e ingeniería en un enfoque integral del diseño del edificio utilizando sistemas y estrategias pasivas (aprovechamiento pasivo de la radiación solar, ventilación pasiva, etc.).
- Adecuar el tiempo de funcionamiento de las instalaciones con sistemas de regulación.

2. Sustitución de las fuentes convencionales de energía por otras fuentes sostenibles

La adecuada utilización de fuentes de energía alternativas posibilita un ahorro energético asociado fundamentalmente a la posibilidad de implantar procesos de mayor eficiencia, así como a la disminución de pérdidas por conversión y transporte dado el aprovechamiento de recursos locales. Entre estas alternativas se recogen fuentes renovables como la biomasa, la energía solar activa o la geotermia de baja temperatura, energías residuales procedentes de otros procesos.

3. Optimización de la eficiencia en la utilización de la energía

Finalmente, una vez que se ha reducido lo máximo posible la demanda energética de un edificio, y se ha planteado la utilización de las fuentes de energía sostenibles más favorables, cualquier disminución adicional del consumo requiere la aplicación de procesos más eficientes. En este sentido, se pueden proponer los siguientes puntos como aspectos fundamentales a considerar:

- Adecuación de la producción de frío o calor a la demanda del edificio, mediante el conveniente fraccionamiento de la potencia instalada y una correcta regulación de la misma.
- Planteamiento de sistemas de almacenamiento térmico que reduzcan las puntas de consumo, posibiliten aprovechar los periodos de funcionamiento más favorables y mejoren la eficiencia estacional de los equipos al limitar el número de arranques y paradas requeridas.
- La recuperación de energías residuales, reutilizando energías que normalmente son desaprovechadas en las instalaciones térmicas de la edificación, como la energía contenida en el aire de expulsión y, que en algunos casos, se evacuan al exterior perdiéndose totalmente.

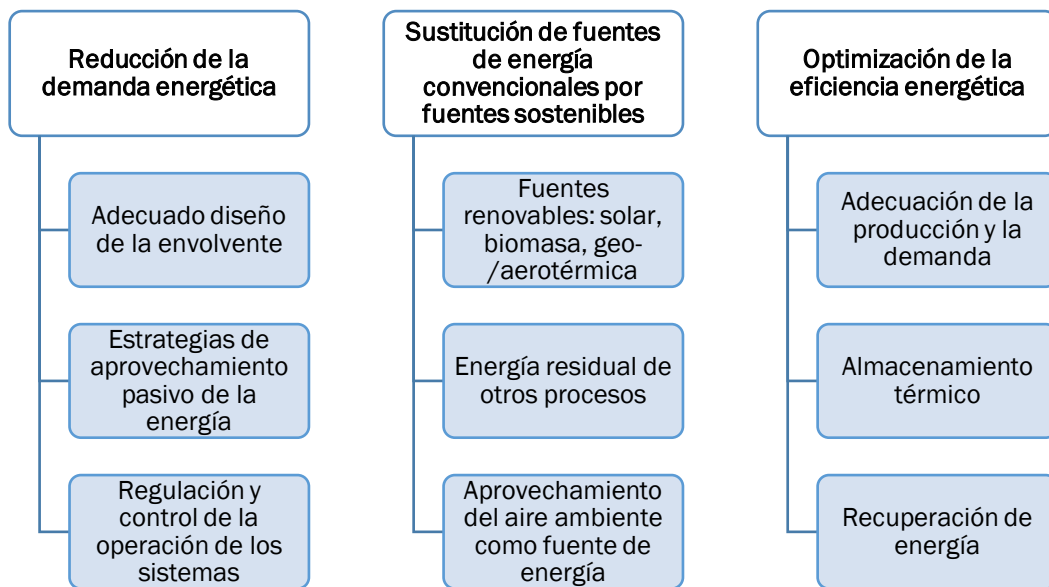


Figura 10. Alternativas para reducir el consumo energético en el sector de la edificación

Una vez mostradas las características más destacadas del uso de la energía en el sector edificios, y enumeradas las principales alternativas a desarrollar para dotar dicho uso de un carácter más racional y sostenible, resulta de interés presentar brevemente la política energética y el marco regulatorio que los agentes competentes han desarrollado en esta misma línea.

En la Unión Europea, toda acción en el ámbito de la energía está enmarcada de algún modo dentro de los llamados objetivos 20-20-20[7] relativos hacia el camino del futuro sostenible, con una economía que genere pocas emisiones de carbono y consuma menos energía. Estos, recogidos en la estrategia de crecimiento de la UE con horizonte 2020, proponen:

1. Reducir las emisiones de efecto invernadero (GEI) un 20 % (o un 30 % si se dan las condiciones) respecto a los niveles de 1990.
2. Ahorrar el 20% del consumo de energía mediante una mayor eficiencia energética, además, en cada país el 10% de las necesidades del transporte deberán cubrirse mediante biocombustibles.
3. Promover las energías renovables hasta el 20%.

Así, conforme a la Directiva 2010/31/EU, los Estados Miembros están obligados a establecer y aplicar requisitos mínimos de eficiencia en edificios nuevos y existentes, asegurar los procedimientos de certificación energética y regular la inspección de calderas y equipos de aire acondicionado. Además, se asegurará que en 2021 todos los nuevos edificios (en 2019 si se trata de edificios de propiedad pública) deban ser 'edificios de energía casi nula'.



Además, de acuerdo al mandato de la Comisión Europea M/480 [8], la implementación de la directiva se complementa con una serie de estándares europeos relacionados con el cálculo de consumos energéticos y sus costes asociados, inspecciones y definiciones varias. Su elaboración es llevada a cabo por cinco comités técnicos distribuidos en las siguientes temáticas: eficiencia térmica de los edificios y sus componentes, ventilación, iluminación, sistemas de calefacción y control y gestión energética de edificios.

Dentro del contexto determinado por la Directiva europea, a nivel nacional, España cuenta con diversas herramientas enfocadas a la sostenibilidad del sector. Entre ellas, resulta interesante destacar:

- El **Código Técnico de la Edificación (CTE)** [9], es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de Noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE). El CTE también se ocupa de la accesibilidad como consecuencia de la Ley 51/2003 de 2 de Diciembre, de igualdad de oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal de las personas con discapacidad, LIONDAU.
- El **Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)**, aprobado por el consejo de Ministros del 20 de julio de 2007 en el R.D. 1027/2007 y modificado en varias ocasiones según R.D. 1826/2009 y R.D. 238/2013. Establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene a través de las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía. Las mayores exigencias en eficiencia energética que establece el RITE están enfocadas a mejorar el rendimiento energético de los equipos de generación de calor y frío y aquellos destinados al movimiento y transporte de fluidos, mejorar el aislamiento en los equipos y conducciones de los fluidos térmicos, y potenciar la regulación y control para mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados. Además el reglamento refleja una tendencia a la utilización de energías renovables disponibles, en especial la energía solar y la biomasa, la incorporación de subsistemas de recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales. Finalmente, obliga a emplear sistemas de contabilización de consumos en el caso de instalaciones colectivas y aboga por la desaparición gradual de los equipos generadores menos eficientes y los combustibles sólidos más contaminantes.
- La **certificación de la eficiencia energética en los edificios** [10], que constituye uno de los puntos básicos de la directiva europea y que en el



territorio nacional está regulada de acuerdo al procedimiento básico aprobado por el R.D. 235/2013. Este texto deroga y completa el anterior R.D. 47/2007 relativo a la certificación de edificios de nueva construcción, e incluye el procedimiento para la certificación de edificios existentes. De acuerdo con él, actualmente la opción general para proceder a la certificación energética de un edificio recurre a programas informáticos que han de ser recogidos en documentos reconocidos y figurar como tales en un registro general. No obstante, existe también un procedimiento establecido para considerar casos particulares no incluidos en los programas disponibles. Por otro lado, la obtención del certificado da derecho a utilizar una etiqueta de eficiencia energética, que debe ser incluida en toda oferta, promoción y publicidad dirigida a la venta o arrendamiento del edificio o unidad del edificio correspondiente.

En definitiva, toda esta evidencia demuestra que la sociedad actual, independientemente del ámbito regional en que se desarrolle, ha adquirido conciencia en relación a una seria problemática energética que viene confirmándose en los últimos tiempos y cuyas principales expectativas de futuro no son positivas. En dicha problemática desempeña un papel fundamental el sector de la edificación, el cual ha de ser objeto de importantes avances hacia la sostenibilidad.

Sin embargo, el concepto de sostenibilidad debe ser entendido de acuerdo a dos aspectos diferenciados, pero igualmente importante. En este sentido, un modelo sostenible será aquel que involucre un uso racional de los recursos manteniendo un determinado nivel de desarrollo y bienestar en el tiempo. Por lo tanto, todos los objetivos, herramientas y acciones presentadas en este apartado y destinadas a promover el ahorro de la energía en el ámbito edificatorio, no pueden plantearse de forma aislada. Deben contemplar la necesidad de mantener o mejorar el nivel de bienestar de los ocupantes, es decir, el nivel de calidad de los ambientes interiores.

1.1.3. Reducción de la demanda de energía

El primer objetivo que debe buscar satisfacer el planteamiento de edificios sostenibles es la minimización de las necesidades energéticas, de forma que los distintos sistemas de acondicionamiento térmico y otra serie de equipamiento eléctrico (p.ej. iluminación) tengan que intervenir lo menos posible. Para ello, en las últimas décadas, la comunidad científica y la industria de la edificación vienen centrando sus esfuerzos en el desarrollo e implantación de conceptos como los descritos a continuación:



1. Aspectos arquitectónicos y diseño de la envolvente del edificio

La fase de diseño de un edificio es la fase más idónea para integrar estrategias enfocadas a la reducción de la demanda energética del mismo, pues el coste asociado a su implantación es considerablemente más reducido que si se acometen en etapas más avanzadas del proyecto. Aspectos como la forma y orientación del edificio, el diseño y la adecuada construcción de la envolvente en términos de aislamiento, masa térmica, superficie acristalada, dispositivos de sombra, etc., o incluso la consideración de estrategias pasivas de las que se hablará más adelante, requieren de un trabajo conjunto de ingeniería y arquitectura desde el primer momento.

2. Forma y orientación del edificio

La forma del edificio influye directamente en la cantidad de energía solar que recibe, así como en la superficie expuesta al exterior, y por tanto en las pérdidas de calor por transmisión. En climas fríos este aspecto es determinante por lo que se recomiendan diseños lo más compacto posibles. En climas más cálidos la relación no es tan clara y no existe una solución óptima fija. De forma similar, la orientación del edificio es el factor más importante en relación al nivel de radiación solar directa recibido, de acuerdo al azimut de sus fachadas. Diversos autores apuntan la recomendación de orientar la fachada predominante en dirección Sur, favoreciendo las ganancias solares en invierno y el control de las mismas en verano.

3. Aislamiento

Por otra parte, el nivel de aislamiento de los cerramientos de un edificio es habitualmente el aspecto abordado de forma más inmediata al pensar en la envolvente del edificio. Resulta un elemento más efectivo energéticamente en edificios con predominio de las necesidades de calefacción. En modo refrigeración un aislamiento excesivo puede perjudicar la evacuación del calor interno del edificio aumentando la demanda y el consumo asociados al enfriamiento. Además, la elección de un adecuado aislamiento no sólo obedece a criterios energéticos sino también a los costes económicos del mismo (Figura 11).

Así, se han dedicado numerosos trabajos a la estimación del espesor de aislamiento óptimo requerido en función de las condiciones climáticas.

Existen muy diversas soluciones para conseguir envolventes de alto rendimiento desde el punto de vista del nivel de aislamiento. Tradicionalmente se han venido utilizando materiales como la lana mineral, el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS), la celulosa, el corcho o los poliuretanos (PUR), cuyos valores de conductividad (0.030 –



0.040 W/(m·K)) son mucho menores que los de los materiales de construcción comunes.

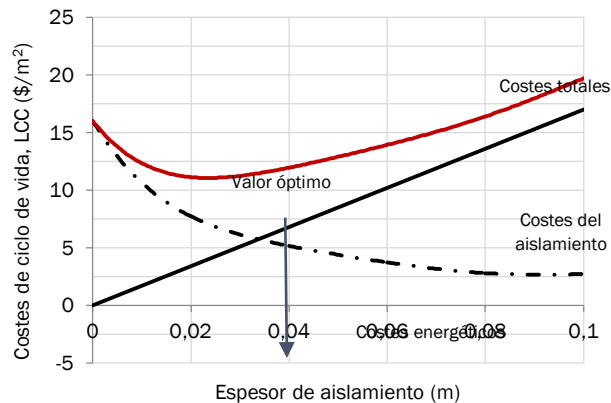


Figura 11. Ejemplo de la variación de los costes de ciclo de vida y de los costes de aislamiento en función del espesor de aislante.

4. Masa térmica

El siguiente concepto sostenible del que puede valerse esta primera fase de diseño del edificio se basa en la utilización pasiva de la masa térmica de la propia construcción en beneficio del mantenimiento de temperaturas moderadas en el interior ante condiciones externas extremas. La inercia térmica de edificios pesados permite amortiguar las oscilaciones de temperatura del clima exterior, reduciendo los requerimientos de energía sobre los sistemas de acondicionamiento. Además, las prestaciones inerciales de los elementos estructurales se han estudiado en muchas ocasiones en combinación con estrategias de ventilación natural nocturna en épocas estivales, que permiten pre-enfriar la masa del edificio haciendo más efectivo el efecto de amortiguación térmica.

5. Superficie acristalada

Por último, la planificación de la superficie acristalada en fachadas y la correspondiente gestión de elementos de sombra son dos conceptos cruciales en el diseño de envolventes eficientes. Ambos deben buscar una solución de compromiso que favorezca la iluminación natural de los espacios interiores limitando los efectos de las ganancias solares y de las pérdidas por transmisión a través de los vidrios sobre la demanda energética del edificio. Las estrategias de sombreado planteadas en este sentido pueden ser 'pasivas', a través de la disposición de elementos fijos en las fachadas o en el entorno (Figura 12) o 'activas', con elementos móviles cuya posición se regula de forma integrada en el sistema global de control del edificio.



En cualquier caso, el diseño óptimo depende en gran medida de las condiciones climáticas y de uso del edificio concreto. La provisión de luz natural a través de mayores superficies acristaladas combinadas con esquemas de control de sombra adecuados favorece el confort visual, a la vez que reduce la carga interna de iluminación y los correspondientes consumos eléctricos y de los sistemas de acondicionamiento. Este tipo de estrategias resultan de especial interés en situaciones con predominio de la demanda de refrigeración. Por su parte, en climas fríos suele tenderse a no plantear superficies acristaladas excesivas, empleando los vidrios de mayor eficiencia de aislamiento posible.



Figura 12. Dos ejemplos de diseño arquitectónico con elementos pasivos de sombra integrados: edificio LUCIA en Valladolid [11] (izquierda) y edificio sede de IDOM Bilbao [12](derecha).

6. Aprovechamiento pasivo de la energía

Un aspecto muy ligado al diseño arquitectónico y de la envolvente del edificio es el aprovechamiento pasivo de la energía disponible (energía solar, ventilación natural, energía del terreno, enfriamiento evaporativo, etc.). De hecho, en la mayoría de ocasiones, este no se puede producir si no se ha tenido en cuenta previamente en el diseño básico del edificio, de forma que se garanticen las condiciones para una aplicación eficiente de las estrategias pasivas en la fase de operación posterior.

El término ‘pasivo’ hace referencia a la utilización de fuentes o sumideros de energía naturales de forma que el ratio entre la energía consumida y la energía puesta en juego sea muy bajo. Por tanto, no está excluido el uso de una pequeña parte de energía mecánica (especialmente asociada al movimiento de fluidos) con el objetivo de favorecer el aprovechamiento pasivo.

Entre los conceptos de mayor interés destacan el muro Trombe, las fachadas ventiladas o de doble piel (*double-skinfaçades*) y las chimeneas solares. Todos ellos aprovechan principios similares utilizando la energía solar para calentar el aire de cavidades generadas en la envolvente del edificio y/o

muros de la misma. Dependiendo de las propiedades de los cerramientos y vidrios involucrados, así como de la distribución y apertura de los ‘conductos’ o cavidades de aire, existen un gran número de variantes de diseño y operación capaces de adaptar estos sistemas para un óptimo aprovechamiento de estrategias de ventilación natural, calefacción pasiva o aislamiento térmico de fachadas.

Respecto a las temperaturas del terreno en verano, incluso en capas próximas a la superficie, es notablemente más baja que la temperatura del aire exterior, por lo que puede ser empleada para disipar calor del edificio. La forma más habitual de hacerlo es a través de intercambiadores tierra-aire (objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado) consistentes en conductos enterrados que permiten pre-enfriar el aire de ventilación antes de impulsarlo al ambiente interior (Figuras 13a y 13b).

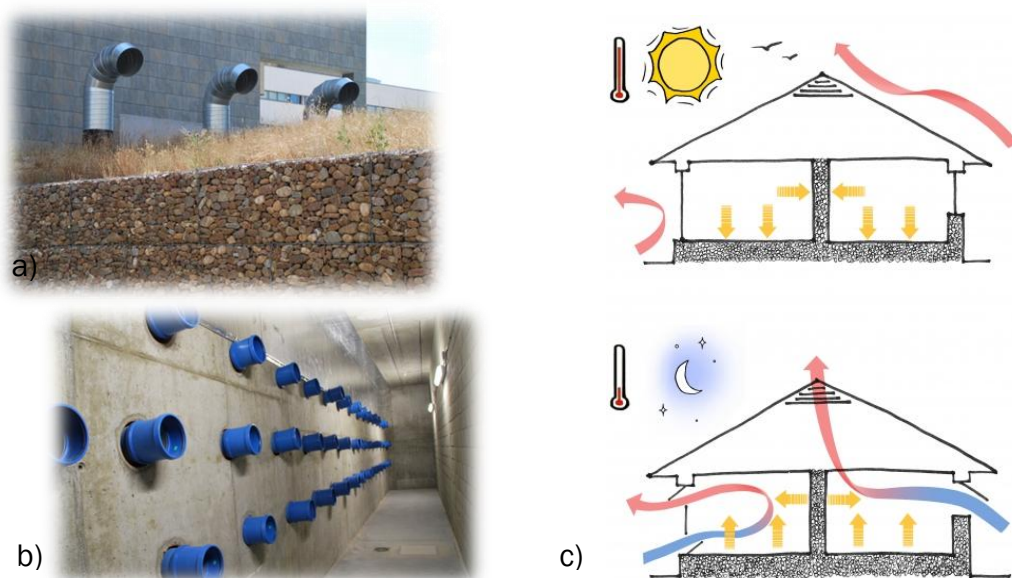


Figura 13. Diversos ejemplos y esquemas de conceptos de enfriamiento pasivo utilizando el aire ambiente o el terreno como sumidero de calor: a) y b) intercambiadores tierra-aire del edificio LUCIA, c) estrategia de ventilación nocturna

Por otro lado, el potencial de enfriamiento del aire ambiente puede ser aprovechado a través de técnicas de ventilación nocturna o de enfriamiento evaporativo. La ventilación nocturna o enfriamiento convectivo nocturno aprovecha el aire a temperaturas más bajas durante la noche para retirar las cargas absorbidas por el edificio durante el día, de forma que reduce el pico de temperatura del día siguiente (Figura 13c). El potencial de esta técnica depende directamente de la diferencia de nivel térmico entre el interior y el exterior durante la noche. Si bien, en un proyecto concreto han de considerarse otras variables como el flujo de aire, la capacidad térmica del edificio y el adecuado acoplamiento entre ambos. Diversos estudios permiten concluir que se trata de un concepto muy efectivo para reducir la demanda de



refrigeración y mejorar el confort térmico tanto en edificios de oficinas como en edificios residenciales independientemente de las condiciones climáticas de contorno.

7. Control y regulación de los sistemas

Por último, una tercera vía para reducir la demanda de energía del edificio se centra en la utilización de adecuados medios de control y regulación durante la fase de operación del edificio. Tradicionalmente, dada su simplicidad, la regulación de los sistemas del edificio se ha llevado a cabo mediante controles on/off o de tipo PID. Sin embargo, sus capacidades son limitadas a la hora de controlar sistemas de elevada inercia o al afrontar condiciones de operación variables. En los últimos tiempos, el diseño de métodos y estrategias de control más sofisticadas se ha hecho viable gracias al desarrollo tecnológico y la reducción de costes asociados al campo del procesamiento y almacenamiento de datos, protocolos de comunicación, tecnología de sensores y actuadores automáticos.

1.1.4. Aprovechamiento de fuentes de energía alternativas

Aún con el mejor diseño pasivo y la mejor implementación de control posible, la operación normal del edificio requiere un determinado consumo de energía. La elección de dónde obtener esa energía puede contribuir en gran medida al concepto global de edificio sostenible. Por lo tanto, una vez expuestas las distintas consideraciones eficientes de diseño y control, encaminadas a lograr una minimización de la demanda, el siguiente foco de atención para la sostenibilidad energética y ambiental está ligado al aprovechamiento de fuentes de energía alternativas.

Se trata de emplear los recursos energéticos disponibles en el entorno local del edificio, provistos por focos naturales (energías renovables y energía del ambiente) o derivados de otros procesos externos primarios (energías residuales). Cabría señalar que algunas de las técnicas pasivas mencionadas en el apartado anterior hacen uso de fuentes de energía alternativas como las aquí planteadas. Sin embargo, pretenden incluirse en este apartado aquellos aprovechamientos típicamente 'activos'.

Referente a la energía solar, se puede considerar dos tecnologías bien diferenciadas: solar fotovoltaica y solar térmica. El uso de la energía solar fotovoltaica constituye la principal vía para abastecer el consumo eléctrico del edificio de forma sostenible. Su integración en los propios elementos constructivos ha experimentado recientemente un crecimiento importante, dando lugar a lo que se conoce como sistemas fotovoltaicos integrados en el edificio (*Building Integrated Photovoltaic*, BIPV). Consisten en la utilización de módulos fotovoltaicos que literalmente forman parte de la estructura de un



edificio convencional como coberturas de techos, tragaluces, claraboyas o fachada. Los módulos fotovoltaicos están cada vez más incorporados desde las etapas iniciales en el diseño y la construcción de nuevos edificios como su fuente principal de electricidad o para ahorro de energía.

Los avances tecnológicos, así como el apoyo gubernamental en ciertos países y las ayudas financieras han contribuido a este desarrollo. Si bien, la producción eléctrica de los BIPVs en comparación con la generación de sistemas convencionales es aún minoritaria.



Figura 14. Sistemas BIPV integrados en los tejados inclinados de un grupo de viviendas (izquierda) y en una cubierta transparente de un edificio no residencial (derecha)

Por su parte, los sistemas de energía solar térmica, basados en la utilización de colectores diseñados para maximizar la absorción de la radiación solar y minimizar las pérdidas en la transferencia de esa energía a un fluido caloportador, se plantea como una opción capaz de cubrir una parte significativa de la demanda energética de edificios sostenibles, fundamentalmente en el ámbito residencial. Dado que las necesidades de calefacción de este tipo de viviendas serán relativamente pequeñas, el sistema solar térmico puede destinarse a abastecer la demanda predominante de agua caliente sanitaria. Por lo tanto, existe un gran potencial técnico para cubrir un amplio porcentaje de los requisitos de calefacción en viviendas. Sin embargo, la competitividad económica de esta tecnología frente a otras soluciones basadas en recursos fósiles es aún limitada dado sus elevados periodos de amortización. Mientras que los costes de operación a lo largo de la vida útil son realmente bajos (dada la disponibilidad gratuita de la radiación solar), a la inversión de los colectores solares se le añade la del resto de componentes del sistema (depósito de acumulación, tuberías, bombas de circulación, controladores, etc.) y los costes de instalación y mantenimiento.

Por otro lado, la aplicación de la energía geotérmica de baja temperatura en edificios se fundamenta en la utilización del subsuelo como foco o sumidero de calor para cubrir parte de la demanda energética. La temperatura del subsuelo a una cierta profundidad es prácticamente constante a lo largo del



año. En concreto, con valores en torno a los 15 °C – 20 °C, dicho nivel térmico es más fresco en verano y más atemperado en invierno que el que posee el aire exterior, lo cual posibilita una operación más eficiente de los sistemas HVAC. Además, otra característica interesante de este recurso es su alto grado de disponibilidad en capas del subsuelo accesibles cercanas a la superficie y en casi cualquier punto geográfico del planeta. Si bien, el potencial de aplicación en una situación concreta depende de las características hidro-geológicas locales del subsuelo, que deben ser analizadas convenientemente con anterioridad.

Por último, la utilización de la biomasa para calentarse en los hogares es quizá uno de los aprovechamientos de los recursos naturales locales más antiguos en la historia de la humanidad, y sin duda el predominante hasta la llegada de la Revolución Industrial. Actualmente la explotación de este recurso con fines energéticos se ha visto como una alternativa sostenible, tanto en aplicaciones de generación térmica como eléctrica. En el ámbito de la edificación son numerosas las variantes tecnológicas disponibles para el abastecimiento de calefacción y agua caliente sanitaria, en función del tipo de combustible y los requerimientos de cada aplicación.

Las materias primas más empleadas en este ámbito son los residuos de las industrias agrícolas (cáscaras de frutos secos, paja de cereal, huesos de aceitunas, etc.) y forestales (astillas, serrines, etc.), así como los residuos de actividades silvícolas y de cultivos leñosos. En muchas ocasiones algunos de estos residuos se transforman en pellets y briquetas para facilitar el almacenamiento y manipulación, pero encareciendo el producto final.

Pese al desarrollo de distintos procesos de conversión como la gasificación o la pirolisis, la gran mayoría de aplicaciones en edificios se basan en la combustión directa de la biomasa para obtener energía térmica. Conviene citar aprovechamientos que van desde pequeñas calderas o estufas individuales utilizadas tradicionalmente en los hogares, pasando por calderas de media potencia capaces de abastecer a todo un bloque residencial o un edificio terciario medio y equiparables a las calderas convencionales de gasóleo o gas natural, hasta calderas de gran potencia que centralizan la generación térmica para dar servicio a todo un distrito.

La biomasa presenta, por lo tanto, una amplia gama de oportunidades para el abastecimiento eficiente de la demanda energética del sector edificios. Sin embargo, el concepto de sostenibilidad asociado a este recurso debe gestionarse con especial precaución. Por una parte, su utilización presenta una clara ventaja en el establecimiento de un balance casi neutro de emisiones de CO₂ a escala global, al cerrar el ciclo del carbono que comenzaron las plantas absorbiéndolo durante su crecimiento, y sólo emitiendo el CO₂ asociado a su procesado o transporte. En cambio, a escala



local las emisiones producidas por la combustión de la biomasa son equiparables a las de los sistemas convencionales, incrementándose incluso en el caso de las partículas emitidas. Por ello, la afección sobre la calidad del aire del entorno cercano debe considerarse en los mismos términos. Por otra parte, más allá del aspecto 'emisiones', la biomasa supone otros beneficios socio-económicos interesantes, al propiciar el desarrollo rural y favorecer la adecuada gestión de distintos tipos de residuos.

1.1.5. Eficiencia energética de sistemas y procesos

Una vez planteada la minimización de la demanda energética del edificio y el uso de fuentes de energía alternativas destinadas a cubrirla, aún es posible acercarse más a los objetivos de sostenibilidad a través de la aplicación de sistemas y procesos energéticos lo más eficientes posibles. Para ello el primer concepto a tener en cuenta está relacionado con la capacidad de ajustar al máximo la operación y producción de los sistemas energéticos a las necesidades del edificio en cada instante. Para que se pueda cumplir este objetivo en primer lugar se debe plantear un dimensionado adecuado de todos los equipos e instalaciones (calderas, enfriadoras, bombas de circulación, ventiladores, etc.) y en segundo lugar por dotar a dichas instalaciones de la capacidad de adaptar su funcionamiento en las situaciones de carga variable que irremediablemente van a tener lugar a lo largo de su vida útil. Actualmente, la tecnología disponible ofrece soluciones muy eficaces a través de equipos de potencia modulante o de velocidad variable a través de variadores de frecuencia integrados o externos. No obstante, si las necesidades de regulación abarcan un rango de variación muy grande o existen restricciones de otro tipo sobre el proyecto por las cuales la modulación no es viable, el 'fraccionamiento de potencia' sigue siendo una posibilidad para reducir este tipo de problemas.

Sin embargo, la variabilidad que ofrecen las energías renovables, como la energía solar o eólica, impide lograr el objetivo anterior de una forma directa imposibilitando una producción de energía renovable. Debido a este problema surge la necesidad de almacenamiento de energía. Mención aparte merecen las tecnologías destinadas a la acumulación de energía eléctrica, de interés por ejemplo en ciertas instalaciones fotovoltaicas. Pero dentro del ámbito de la edificación sostenible y en especial en el contexto en el que se enmarca este trabajo, el foco de atención está situado en las opciones de almacenamiento de energía térmica (*Thermal Energy Storage*, TES, [13]).

Una característica particular de este tipo de sistemas es la enorme diversidad de los requerimientos específicos de estos según el tipo de aplicación, en términos de niveles térmicos, potencia necesaria, escala temporal de la acumulación e incluso tipo de fluido caloportador utilizado. Debido a esto, es igualmente amplia la gama de diseños y conceptos de acumulación térmica

en sometidos a estudio en la actualidad. La Asociación Europea del Almacenamiento de Energía (EASE) [14] aporta una interesante visión con consideraciones relativas al estado del arte de las tecnologías TES, así como de sus necesidades y perspectivas de desarrollo en los próximos años. Atendiendo a los principios físicos en que se basan los distintos métodos existentes, es habitual clasificarlos en tres grupos: almacenamiento sensible, latente y termo-químico. Si bien, prácticamente las únicas soluciones comercialmente disponibles se refieren a la acumulación sensible.

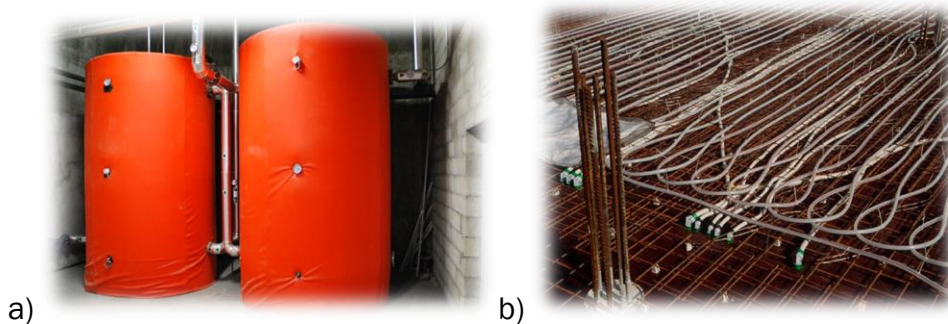


Figura 14. Ejemplos de sistemas de acumulación de energía térmica sensible en edificios: depósitos de inercia tradicionales (a) y sistema TABS (b)

El medio de almacenamiento más utilizado en edificios es el agua, utilizada en depósitos de inercia aislados para un gran número de aplicaciones tanto en el ámbito residencial, como en edificios terciarios o en la industria. Del mismo modo, una alternativa ya comentada a lo largo de este capítulo y que es clave en el desarrollo de este trabajo, es el aprovechamiento de la propia estructura del edificio como medio sólido de almacenamiento térmico sensible. Este concepto se puede aprovechar de forma pasiva o bien activando la masa del edificio mediante sistemas de agua embebidos en ella (*Thermally Activated Building Systems, TABS*).

Por su parte, el almacenamiento latente se encuentra en fases avanzadas de I+D, con soluciones comerciales para ciertas aplicaciones seleccionadas; mientras que la tecnología termo-química se halla prácticamente aún en fase de laboratorio. En particular, dada la limitación de las posibilidades de los sistemas sensibles, la utilización de materiales de cambio de fase (*Phase Change Materials, PCM*) con mayor capacidad de almacenamiento asociada a la explotación del calor latente, se ha venido estudiando en los últimos tiempos también en el entorno edificatorio.

Por otra parte, el almacenamiento subterráneo resulta de especial importancia en el planteamiento de instalaciones geotérmicas con bomba de calor que deben funcionar preferentemente a lo largo de todo el año, acumulando calor en el terreno durante el verano y extrayéndolo en invierno.

Finalmente, la recuperación de calor en procesos dentro de las propias instalaciones del edificio es una estrategia de sostenibilidad bastante consolidada en la actualidad. En este apartado se podrían considerar tanto el aprovechamiento de flujos de energía residual como la transferencia de calor entre zonas del edificio que de forma simultánea registran distintas necesidades energéticas. Por su parte, los equipos de recuperación del calor residual son generalmente intercambiadores térmicos más o menos complejos, pudiendo darse en ellos tanto flujos de calor como de masa.

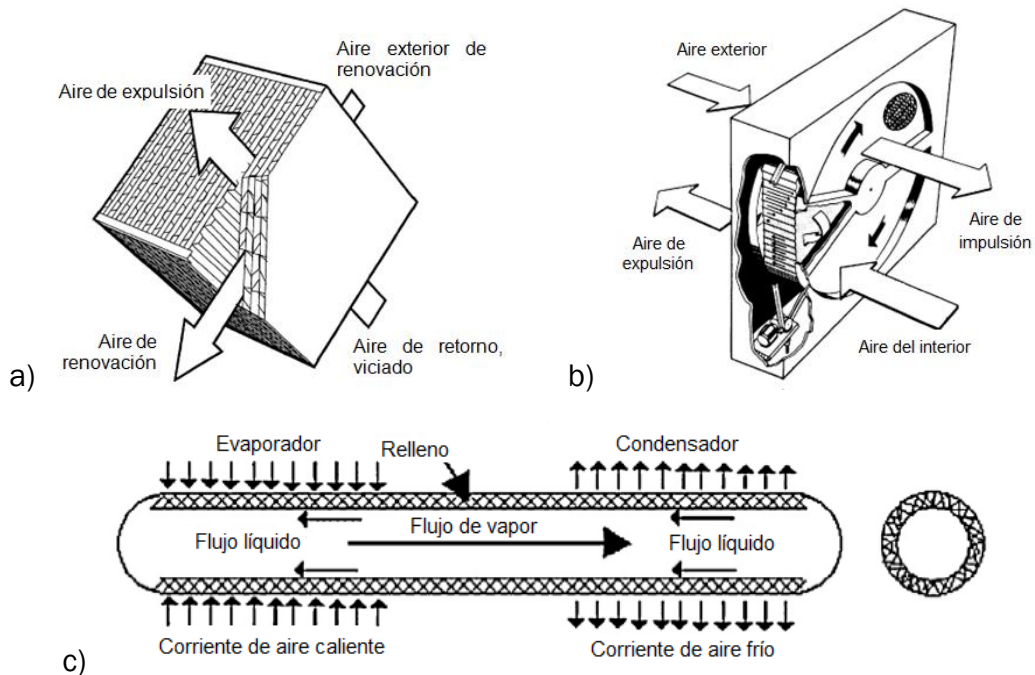


Figura 16. Distintos esquemas de equipos recuperadores de calor: a) de placas, b) rotativo y c) tipo 'heat-pipes' [15]

En el ámbito de la climatización de edificios, el interés energético y económico de esta opción recae especialmente en aquellas aplicaciones que, bien trabajan con altos caudales de ventilación, o bien requieren operar durante muchas horas a lo largo del año, o bien presentan saltos térmicos elevados entre el aire exterior y el interior en condiciones de confort durante largos periodos.

A lo largo de las últimas décadas, diversos sistemas de recuperación de energía han sido estudiados y aplicados para el intercambio de calor entre las corrientes de aire de expulsión e impulsión. Es habitual plantear una clasificación atendiendo al tipo de construcción de estos equipos, considerando así recuperadores de placas, recuperadores rotativos o ruedas de recuperación, sistemas de dos baterías o 'run-around' y recuperadores tipo 'heat-pipe'.



1.2. Intercambiadores de calor tierra-aire (EAHX)

A continuación se introduce el concepto de intercambiadores de calor tierra-aire como objeto del presente proyecto para entender el origen y desarrollo histórico, campo de aplicación, principio de funcionamiento requerido y el marco legal en el cual se encuentran dichas instalaciones.

1.2.1. Origen y desarrollo

La energía geotérmica proviene del calor interior de la Tierra. Un calor que se alimenta, por un lado de la desintegración de isótopos radiactivos y por otro, de movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra y del calor latente de la cristalización del núcleo externo.

Considerando toda la superficie de la Tierra, la potencia geotérmica total que nos llega desde el interior es de $4,2 \times 10^{12}$ J. Se trata de una cantidad inmensa de energía, pero solo una fracción de ella puede ser utilizada por la humanidad. Por lo tanto, la energía geotérmica es, en su amplio sentido, la energía calorífica que la tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre.

Así, se denomina recurso geotérmico a la porción del calor que, desprendido desde el interior de la tierra puede ser aprovechado por el hombre en condiciones técnicas y económicas. Se clasifican en función de la temperatura del fluido geotermal que determinarán sus usos y aplicaciones. Por tanto, el objetivo de la geotermia es el aprovechamiento de esa energía calorífica del interior de la tierra.

Cuando la temperatura del yacimiento no es suficiente para producir energía eléctrica sus principales aplicaciones son térmicas en los sectores industrial, servicios y residencial. En el caso de temperaturas por debajo de los 100°C puede hacerse un aprovechamiento directo o a través de una bomba de calor geotérmica para calefacción y refrigeración, y cuando se trata de recursos de temperaturas muy bajas (por debajo de los 25°C) las posibilidades de uso están en la climatización y obtención de agua caliente.

Hasta ahora, la utilización de esta energía en el mundo ha estado limitada a áreas en las cuales las condiciones geológicas eran muy favorables. Pero los avances tecnológicos actuales en equipos y las mejoras en la prospección y perforación, permiten a la geotermia a día de hoy disponer de tecnologías para la producción de electricidad a partir de recursos geotérmicos de temperaturas notablemente inferiores a las que se precisaban años atrás y para la generación artificial de “yacimientos estimulados” (EGS) en los que es precisa la intervención directa del hombre para la creación del yacimiento, lo que añade un gran potencial de futuro para la geotermia de alta temperatura.



La energía geotérmica es una forma de aprovechamiento energético sostenible con presente y futuro, tanto desde el punto de vista de aprovisionamiento energético de elevadas garantías, como desde el punto de vista térmico, como alternativa de alta eficiencia energética frente a los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración.

La tendencia actual hacia tecnologías más sostenibles ha generado el resurgir del interés en el concepto de los intercambiadores tierra-aire.

En origen el intercambiador de calor o también llamado pozo provenzal, fue una canalización en piedra enterrada en el flanco de una colina que servía para canalizar por convección natural un flujo de aire que transitaba desde una boca externa a través de una conducción hacia la pieza principal de las construcciones tradicionales. En invierno la tierra recalienta este aire entrante mientras que en verano lo enfría gracias a la inercia térmica del suelo. Un sistema poco sofisticado y de baja eficiencia pero que en una edificación provenzal tradicional, donde la inercia térmica es elevada debido a la existencia de muros o paredes de gran espesor y pocas aberturas, el resultado es más que apreciable.



Figura 17. Imagen del Castillo de Predjamski, Postojna, Eslovenia [16]

El intercambiador más simple viene siendo usado de forma intuitiva por el hombre desde la prehistoria. Un ejemplo es el castillo de Predjamski, en Postojna, Eslovenia, fue construido en la primera mitad del siglo XII.

Otro gran ejemplo es la Capadocia [17], una región de Anatolia Central, Turquía, la cual se caracteriza por tener una formación geológica única en el mundo. Los habitantes de la región construyeron refugios subterráneos, donde ciudades enteras podían refugiarse en el subsuelo y subsistir durante muchos meses. Estas ciudades estaban construidas en varios niveles y equipadas con respiraderos, pozos de agua y lo necesario para albergar poblaciones que podían llegar hasta 20.000 habitantes.



Figura 18. Imagen de la Capadocia, Anatolia Central, Turquía

1.2.2. Campo de aplicación

La situación actual en la que se tiende siempre a un aumento del grado de bienestar tiene como consecuencia un aumento del consumo energético. La necesidad de hacer frente a este aumento de consumo de energía se explica por las siguientes razones fundamentales:

- Aumento de precios de los combustibles fósiles.
- Se prevé una escasez de aprovisionamiento de combustibles fósiles en las próximas décadas (por agotamiento de reservas y por distribución localizada de éstas en el planeta), lo que encarecerá aún más el producto.
- La generación de energía a partir de combustibles fósiles provoca un elevado impacto medioambiental debido al efecto invernadero. Para conseguir el cumplimiento de las normativas elaboradas para evitar estas emisiones se debe recurrir a otros métodos de generación de energía (como las energías renovables).

Si se quiere tener un desarrollo sostenible (ideal de la sociedad) se deben buscar soluciones a los problemas propuestos. Con objeto de potenciar y fomentar el uso más racional de la energía en instalaciones térmicas de los edificios, normalmente destinadas a proporcionar de forma segura y eficiente los servicios de climatización necesarios, para atender los requisitos de bienestar térmico y de calidad del aire interior, hay que incorporar nuevos avances térmicos compatibles con las exigencias energéticas y medioambientales, mejorando el rendimiento de los equipos y sistemas.

Las diferentes vías para conseguir un ahorro de energía en los edificios se pueden agrupar en aquéllas destinadas a:

- Disminuir la demanda de energía en los edificios.
- Sustituir las fuentes de energía convencionales por energías renovables (solar térmica, fotovoltaica, biomasa o geotérmica).



- Utilizar sistemas y equipos térmicos más eficientes.
- La recuperación de energía residual y el enfriamiento gratuito se puede contemplar tanto como una forma de reducir la demanda, como una fuente alternativa o como un método para mejorar la eficiencia de otros sistemas.

Es precisamente por ello que aquí se presta atención, fundamentalmente a la recuperación de energía residual.

Las siguientes páginas del documento intentan explicar de forma teórica el sistema de intercambiadores de calor tierra-aire, ensayado en el laboratorio de Termotecnia de la Universidad de Valladolid.

1.2.3. Principio de funcionamiento

Se entiende por recuperador de energía a aquel dispositivo que permite la reutilización del calor residual de un sistema y cuyo objetivo final es alcanzar la eficiencia máxima de la instalación.

Los recuperadores de energía en las instalaciones de climatización utilizan el calor sensible y latente residual del propio proceso manteniendo una adecuada calidad del aire interior sin penalizar energéticamente los sistemas de adecuación higrotérmica del aire impulsado a los locales. Su empleo permite además:

- Reducir la central energética (costes de inversión).
- Reducir el consumo de energía de funcionamiento (costes de explotación).

Habitualmente se consideran dos estrategias fundamentales para la recuperación de energía en climatización: la recuperación de la energía del aire de extracción y los sistemas de transferencia de energía entre distintas zonas del edificio.

El intercambiador de calor tierra-aire es de hecho un intercambiador geotérmico que asegura la función de climatización estival o invernal del aire de ventilación. Este sistema también es llamado pozo canadiense en referencia a la función de precalentamiento invernal del aire de ventilación.

Los intercambiadores de calor tierra-aire se basan en la utilización de la energía térmica del subsuelo para pretratar el aire de ventilación de los edificios. El aire así obtenido presenta un mayor grado de confort térmico al obtener un aire más cálido del habitual en tiempo frío y más fresco en tiempo caluroso.

La temperatura del subsuelo inmediato en nuestras latitudes es relativamente constante alrededor de los 15°C a 2 metros de profundidad.



En una instalación tipo el aire penetra dentro del pozo por una toma de aire debidamente protegida, circulando por canalizaciones enterradas gracias a un sistema de impulsión y es repartido por las estancias del edificio a climatizar asegurando un aporte de aire nuevo al local.

Para una correcta implementación en un edificio moderno el procedimiento es mejorado mediante la solución de los posibles problemas de condensación en las canalizaciones así como la optimización de la regulación térmica mediante el reparto de aire a cada pieza o volumen individual así como un correcto tratamiento del nivel sonoro del soplado dentro del pozo dado que dicho soplado en la actualidad es asistido por extractores o ventiladores.

Las ventajas del EAHX son numerosas. En principio requiere una inversión mucho menor que una climatización reversible convencional, especialmente si el diseño del edificio ya contempla dicha posibilidad, y por otra parte los requerimientos energéticos son completamente marginales implicando así mismo un entretenimiento y mantenimiento muy sobrios. Debe destacarse que el sistema es especialmente duradero y completamente sostenible y ecológico.

Existen ciertos condicionamientos en el funcionamiento de un intercambiador tierra-aire, que pueden ser resumidos en los siguientes puntos:

- Las funciones de precalentamiento en invierno y refrigeración en verano están afectadas por un desfase diario y otro estacional, dados por la inercia térmica del subsuelo. Esta inercia térmica condiciona un desfase temporal alcanzando el subsuelo inmediato los valores más frescos por la mañana, tras la noche y en primavera tras el invierno y los valores más cálidos por la tarde tras el mediodía y en otoño tras el verano.
- El almacenamiento de calor debido a las oscilaciones estacionales se propaga unos 3 m alrededor de los conductos mientras que en la oscilación diaria se propaga unos 20 cm de tal manera que las oscilaciones diarias primarán sobre las oscilaciones estacionales que requieren una masa de almacenamiento más importante y además se encuentran limitadas por una difusión en profundidad.

El uso de intercambiadores de calor tierra-aire en acondicionamiento térmico de edificios se ha extendido en los últimos años, haciéndose particularmente útil en invernaderos, en los que en muchos casos permite un ahorro de más del 45% de sus requerimientos energéticos y en edificios públicos (hoteles, escuelas...).

1.2.4. Marco legal

A este respecto cabe señalar que la energía geotérmica es un recurso minero [18]. Hace años el aprovechamiento geotérmico de un yacimiento



hidrogeotérmico exigía una zona geológica a temperatura anormalmente alta, una profundidad accesible y la existencia de agua, pero hoy en día el agua y la temperatura anormalmente alta no son estrictamente necesarias. Dada su elevada eficiencia, se busca fomentar el uso de alternativas de climatización a través de su inclusión en las nuevas normativas. Referente a los recuperadores de energía geotérmica se debe prestar atención a la normativa sobre las instalaciones geotérmicas de la Dirección General de Industria, Energía y Minas, que dice:

- *Ley 22/1973 :*
 - *Régimen jurídico de la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos, cualesquiera que fueron en su origen y estado físico.*
 - *Los yacimientos son bienes de Dominio Público.*
 - *Clasifica los recursos en cuatro secciones:*
 - Sección A*
 - Sección B*
 - Sección C*
 - Sección D*
- *Ley de Minas:*
 - *Regula el régimen jurídico de la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos, cualesquiera que fueron su origen y estado físico, haciendo referencia expresa a los recursos geotérmicos en su inclusión en la sección D junto con los carbones, los materiales radiactivos, las rocas bituminosas y cualesquiera otros yacimientos minerales o recursos geológicos de interés energético.*
 - *Queda fuera del ámbito de la Ley de Minas la extracción ocasional y de escasa importancia de recursos minerales, cualquiera que sea su clasificación, siempre que se lleve a cabo por el propietario de un terreno para su uso exclusivo y no exija la aplicación de técnica minera alguna.*

Dicho régimen normativo siempre dependerá del fin del aprovechamiento.



Capítulo 2. Caso de estudio: El edificio LUCIA



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario



2.1. Introducción

El objeto del proyecto es la instalación que compone el sistema geotérmico de intercambiador de calor tierra-aire, ubicada en el edificio LUCIA (Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada) de reciente construcción, levantado en el Campus Miguel Delibes de la Universidad de Valladolid.



Figura 19. Vista aérea de la ubicación del edificio LUCIA

Esta instalación forma parte del sistema de climatización del edificio y está soterrado a una profundidad de 2 metros bajo la capa vegetal que compone la parcela. El sistema geotérmico aprovecha el diferencial de temperatura del subsuelo con el exterior para aportar aire frío o caliente en la ventilación del edificio cuando sea necesario, dado que la temperatura a esa profundidad es constante (unos 15°C), con independencia de la temperatura existente en superficie.

El edificio supone una superficie total construida de 7.500 m² y además de ser una infraestructura funcional y avanzada para la investigación científica aplicada, es un edificio de referencia en eficiencia energética y arquitectura sostenible. Se trata de un edificio destinado a la investigación sobre los aspectos sociales de la edificación sostenible, prototipo para verificar hipótesis sobre las cuales se asientan los métodos y evaluación medioambiental de edificios e investigar sobre aspectos que arrojen luz sobre temas hasta ahora sin paramétrica, utilizando únicamente energías renovables. Las claves para conseguir este estudio se basan en el ahorro energético, la utilización de materiales de bajo impacto medioambiental y de la gestión de los residuos que se producirán en el edificio tanto en las fases



de construcción y uso, como en la de futura demolición, con estrategias para desmontaje, reutilización y reciclado.

El diseño bioclimático, el incremento del aislamiento, la ventilación pasiva y otras estrategias, permiten una reducción de la demanda energética en más del 50%.

En iluminación se consigue un ahorro del 45% en el gasto mediante un 46% de superficie acristalada, el especial tratamiento de huecos, los dispositivos de iluminación cenital (tubos de luz) y regulación de las luminarias en función de la luminosidad exterior (Figura 20).

El ahorro del gasto de energía en este edificio es superior al 60%, a lo que se añadiría la energía cedida a otros edificios anejos. El ahorro de estos otros edificios sería del 30%.

Todas las energías utilizadas son renovables:

- Un sistema de trigeración con biomasa que genera la electricidad necesaria, calefacción, agua caliente y refrigeración.
- Energía fotovoltaica.
- Pozos geotérmicos (objetivo de este estudio).

Con todo esto se genera un edificio de energía nula y con el cual afirmar que el edificio tiene un balance 0 (cero) de CO₂, es decir, se trata de un edificio que tiene la capacidad de generar toda la energía que precisa para funcionar.

Además y gracias a todas estas características el edificio LUCIA ha sido galardonado con multitud de premios y reconocimientos tales como:

- *Premio Green Buildingsolutions 2015*, a la categoría de Edificios de energía nula. Premio organizado por la red Construction21 dentro de los actos de la Conferencia Internacional sobre el cambio climático COP21 en París.
- *Premio ENERAGEN 2015*, en la categoría de edificación. Galardón que constituye un reconocimiento público de las agencias de energía a las mejores actuaciones en pro de la sostenibilidad energética a nivel nacional.
- *3^{er} Premio en el MEDITERRANEAN SUSTAINABLE ARCHITECTURE 2013*, entregado por el equipo de Competencia Arquitectura Sostenible mediterránea para contribuir a la arquitectura sostenible en el Mediterráneo y promover el diálogo sobre la aplicación de las estrategias leves de la sostenibilidad.
- También ha conseguido 5 HOJAS en la certificación VERDE y ha obtenido la calificación de LEED PLATINUM con 98 puntos.



Figura 20. Disposición del acristalamiento para la correcta disposición lumínica del edificio LUCIA

Enlazando con el capítulo anterior podemos decir que a día de hoy, el edificio LUCIA cumple con las exigencias requeridas por Europa, constituyéndose como uno de los primeros edificios de “cero emisiones” en el conjunto español, cumpliendo con los requerimientos ya mencionados anteriormente que vuelven a estar presente y que se puede formular de la siguiente manera:

Ahorro energético + Uso eficiente de la Energía + Energías renovables

Por todo ello, el edificio LUCIA además de tratarse de una infraestructura funcional y avanzada para la investigación científica aplicada es una referencia en eficiencia energética y arquitectura sostenible.

Cabe destacar, dentro de este ámbito, la mención a otros edificios de iguales características y que fueron un referente puntero en la edificación sostenible de España. En primer lugar mencionar el primer edificio cero emisiones en España que corresponde a la sede de Acciona Solar [19], cuya construcción en el parque tecnológico de Pamplona finalizó en 2007. Con una superficie construida de 2591 m², es el primer edificio en España de uso terciario (oficinas) no experimental, concebido y certificado como “cero emisiones”, cubriendo así todas sus necesidades energéticas sin emitir gases de efecto invernadero. En cuanto a los recursos energéticos, el edificio Acciona cubre su demanda mediante el uso de un mix de energías renovables: fotovoltaica, solar térmica, caldera de biodiesel con recuperación de calor y geotermia (Figura 21).



Figura 21. Edificio ACCIONA en el Parque Técnico de Pamplona.

Por otra parte, otro edificio a destacar es la nueva sede de la empresa de ingeniería Idom [20], en Madrid, que se ha convertido en otra referencia imprescindible en el terreno de la eficiencia energética, el confort y el ahorro de agua en un edificio de oficinas. Para esta empresa, este proyecto fue una manera de explicar desde su sede física su cultura y sus procesos de trabajo y una oportunidad para convertir un edificio en escaparate de su filosofía arquitectónica. Lo que buscaban, en definitiva, era un edificio rigurosamente sostenible, que encerrara un adecuado balance ecológico, económico y social, y que permitiera trabajar bajo un clima saludable (sin frío, sin calor, sin deslumbramientos, sin elementos tóxicos, etc.). El edificio Idom utiliza el sistema hidrónico, conseguido gracias al TABS (Thermally Active Building System). Este concepto fue usado a principios del siglo XX y se encuentra actualmente muy extendido. En España este es el segundo edificio con esta tecnología y el primero con la combinación TABS.



Figura 22. Edificio Idom en Madrid.

Estos casos reales demuestran a la sociedad tres conceptos a tener en mente:

1. Es posible realizar edificios operacionales que tengan un balance energético nulo. Es decir, no hay barreras tecnológicas, económicas ni climáticas al respecto.
2. España dispone del saber hacer y de la experiencia para seguir desarrollando este modelo si hay voluntad política al respecto.
3. Dicho modelo es económicamente viable al tener un retorno de inversión inferior a 10 años, y se podrían diseñar fácilmente planes de financiación acordes.

2.2. Datos generales del sistema EAHX del edificio LUCIA

El recuperador de energía geotérmica (EAHX) forma parte de la instalación de ventilación del edificio LUCIA citado anteriormente. Su instalación consta de 52 tubos de polietileno de alta densidad PE 80-250 mm, soterrados en tierras procedentes de la obra por tongadas de 30 cm, regado y compactado por medios mecánicos, repartidos en filas de 17,18 y 17, con una longitud de 16,7 m en posición horizontal (Figuras 23, 24 y 25).

La superficie de este terreno está compuesta por una pradera silvestre a partir de hidrosiembra controlada, de herbáceas autóctonas para un clima continental básico. La posición de los tubos es horizontal, con una pendiente del 1% hacia el edificio. El material de los tubos es polietileno y la profundidad de medida corresponde a:

Fila 1: 2,02 m

Fila 2: 2,72 m

Fila 3: 3,42 m

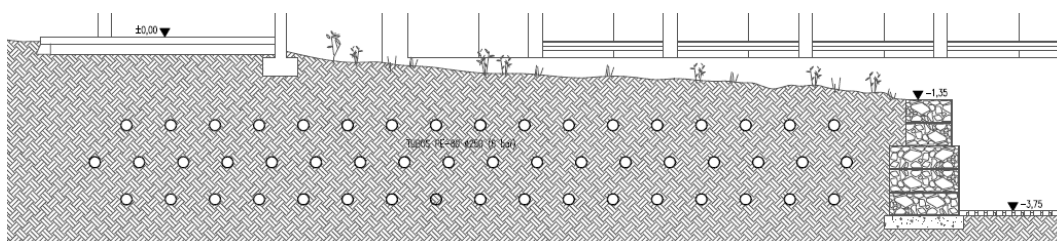


Figura 23. Vista de la sección de los tubos en el terreno.

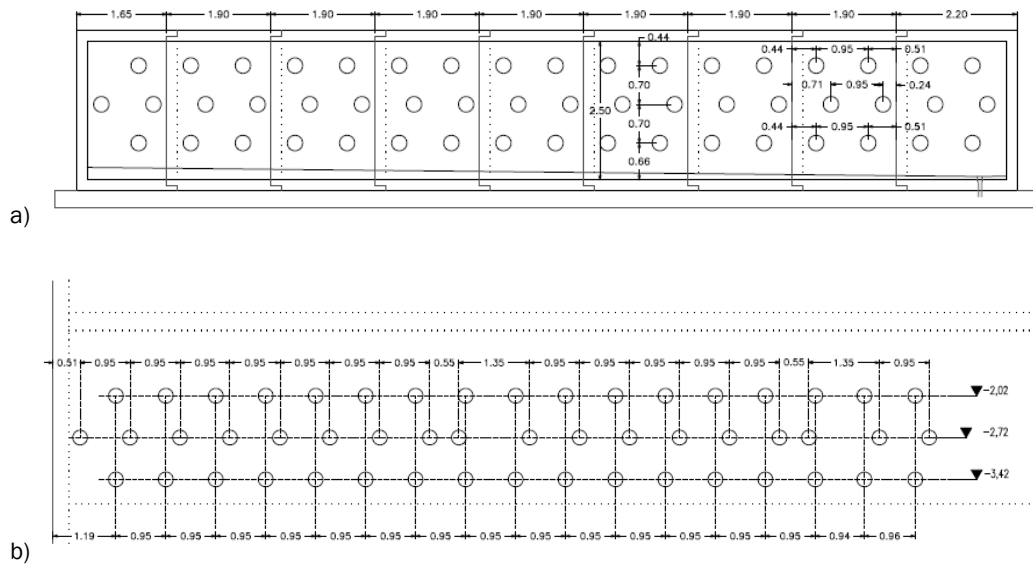


Figura 24. a) y b) Vista de la sección de los tubos en la galería de entrada de aire.

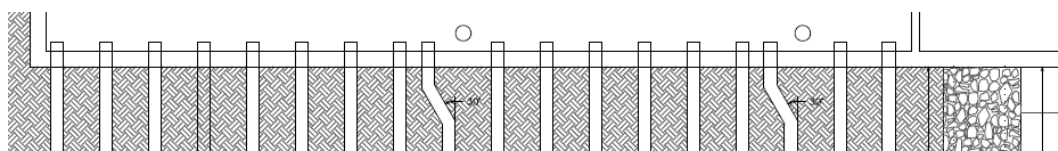


Figura 25. Vista de la planta y sección de los tubos en la descarga de aire al edificio.

La separación vertical y horizontal corresponde a:

$$L_v = 70 \text{ cm}$$

$$L_{H1} = 27 \text{ cm}$$

$$L_{H2} = 68 \text{ cm}$$

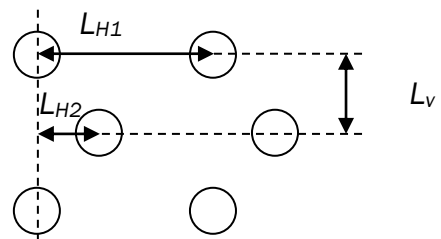


Figura 26. Separación vertical y horizontal

Y la separación diagonal:

$$L_{D1} \approx 75 \text{ cm}$$

$$L_{D2} \approx 98 \text{ cm}$$

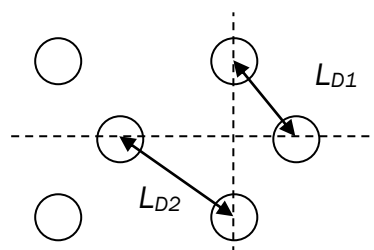


Figura 27. Diagonal

La toma de aire es visual (Figura 31), compuesta por tres tomas individuales que recogen aire del exterior y a través de los tubos mencionados, se

introduce a una cámara en la cual posteriormente se extrae el aire mediante ventiladores de impulsión hacia la climatizadora y su posterior reparto para la ventilación del edificio (Figura 32).

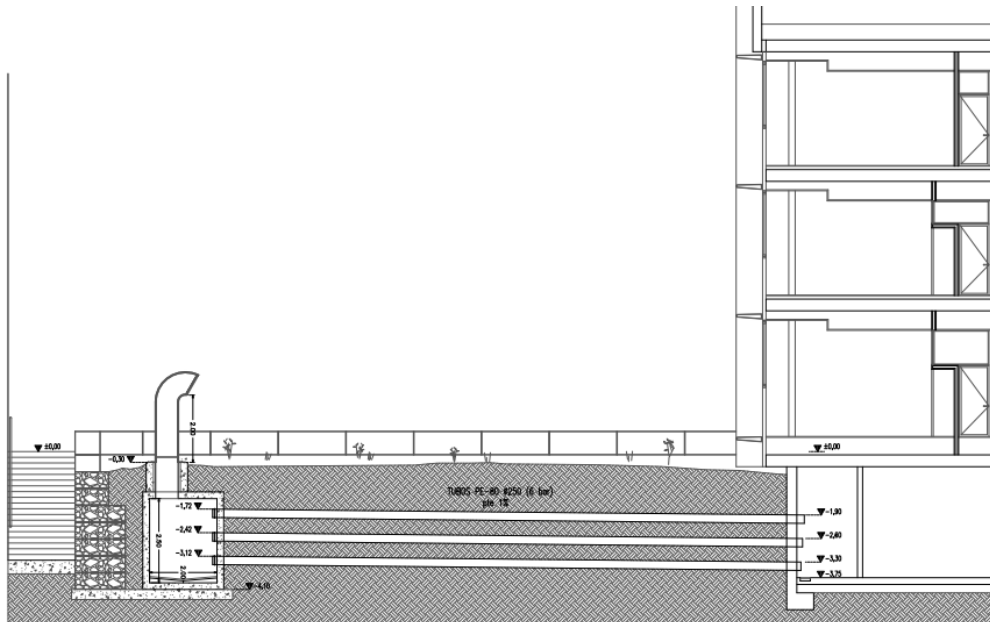


Figura 30. Plano descriptivo de la instalación.



Figura 30. Toma de Aire a la entrada de la instalación.



Figura 31. Imagen de la salida de aire de los pozos a la cavidad anterior a la UTA.

El dimensionamiento del EAHX está determinado, sobre todo, por los siguientes parámetros:

- Caudal volumétrico de aire.
- Profundidad de montaje.
- Material del tubo.
- Valores característicos del subsuelo.
- Clima en el emplazamiento de la instalación.

El aire de entrada en la climatizadora o Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) puede proceder de dos vertientes diferentes:

1. Desde la pre-cámara del sistema EAHX (verde).
2. Directamente del exterior (azul).

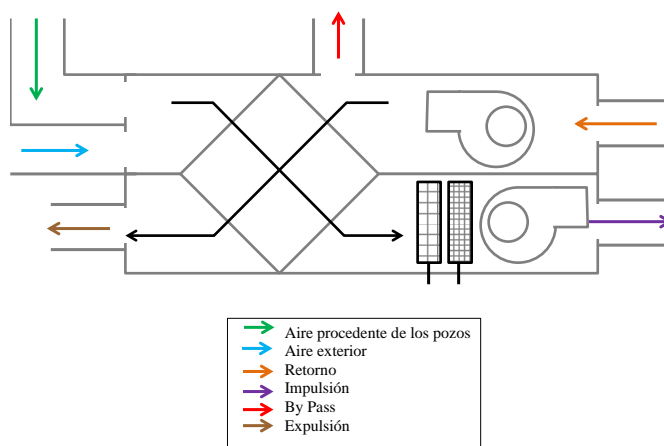


Figura 32. Esquema de flujos de aire que atraviesan la UTA.

Esta instalación, aparentemente simple, está dotada de sistemas de monitorización mediante sondas de temperatura, humedad y presión y un control de compuertas y ventiladores que regulan el paso de aire al edificio.

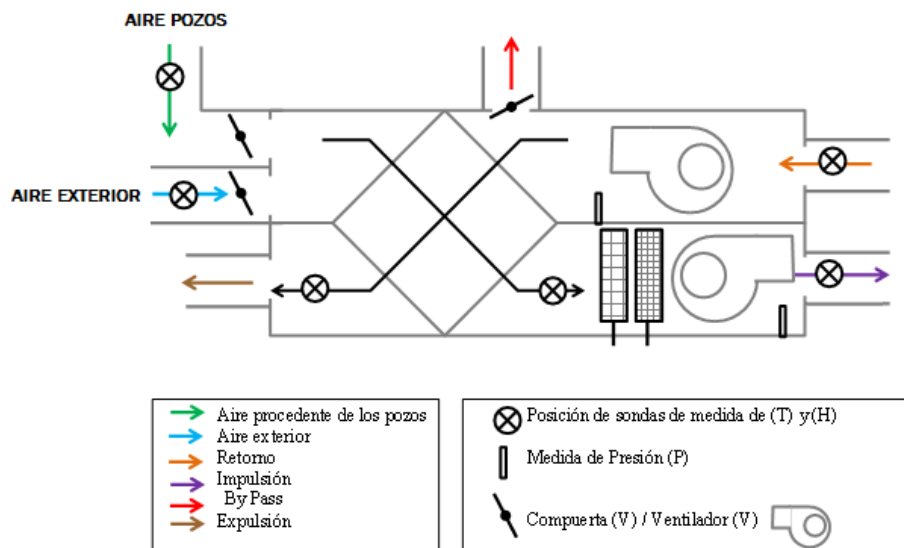


Figura 33. Esquema de flujos de aire que atraviesan la UTA con sistemas de monitorización.

Descrita la instalación en los próximos capítulos se plantean el análisis y los modelos de estudio necesarios para dar una forma más real a este estudio.



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario





Capítulo 3. Análisis de medidas experimentales



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario





3.1. Análisis del comportamiento general del sistema

El edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid, tal como ya se ha avanzado en el capítulo anterior, se puede entender como un proyecto de demostración de edificación sostenible en el ámbito universitario. Como tal, este edificio fue equipado con un importante número de puntos de medida para monitorizar y controlar el funcionamiento de las instalaciones singulares que en él se implantaron; y el sistema de pre-acondicionamiento del aire de ventilación a través del intercambiador de calor enterrado no es una excepción.

La disposición de estos puntos de medida ofrece una gran cantidad de datos de interés para entender la operación del sistema y plantear posibles mejoras tanto en su diseño como en su operación. Por esta razón, una de las primeras tareas abordadas en este proyecto fue la adquisición y análisis de medidas experimentales a partir de los puntos de medida relevantes para el sistema de pozos canadienses.

Se centrará la atención en las siguientes variables:

- Temperatura del aire exterior y temperatura a la salida de los pozos canadienses.
- Posición de las compuertas en los conductos de aire exterior y de aporte de aire desde la pre-cámara del sistema EAHX.
- Régimen de giro del ventilador, expresado en % de su velocidad máxima.

Adicionalmente, debe señalarse que como muestra representativa de los datos obtenidos del sistema de monitorización del edificio referidos a los pozos se muestra en adelante la información referente a dos meses del funcionamiento en periodos de verano (julio y agosto de 2015) y de invierno (enero y febrero de 2016).

3.1.1. Funcionamiento en periodo de INVIERNO

Las figuras 34 y 35 muestran los resultados derivados de la monitorización del sistema durante los meses de invierno de enero y febrero de 2016.

La primera y más clara observación que puede realizarse tiene que ver con el principio de aprovechamiento básico del sistema de pozos canadienses. En este sentido, al comparar la temperatura del aire exterior y la temperatura del aire a la salida de los pozos se aprecia claramente como esta segunda es más favorable durante la mayor parte del tiempo de operación. Esto es, la temperatura de salida de los pozos en invierno es superior a la temperatura del aire exterior, por lo que su utilización en el sistema de ventilación del edificio resulta beneficiosa al requerir menor cantidad de energía para su acondicionamiento (en otras palabras, reduce la carga de ventilación) sin perjudicar, en principio, los requisitos de calidad del aire.



Las gráficas correspondientes a la velocidad de giro del ventilador permiten ver los tiempos de funcionamiento del sistema de ventilación. Valores nulos de la velocidad del ventilador corresponden con paradas del sistema (por ejemplo, durante periodos de no ocupación en el edificio en los cuales no se requiere aportar aire limpio) o con eventuales fallos en el sistema de monitorización. Si bien, afortunadamente se dispone de datos de buena calidad y este tipo de eventos son poco frecuentes. Únicamente se ha detectado un periodo asociado a una 'caída' de la adquisición de la sonda de temperatura de aire exterior que se puede observar en los datos de febrero de 2016 hacia la hora 1080.

El grado de apertura de las compuertas del conducto de aire exterior y de aire procedente de los pozos se muestra en las figuras b y c de cada uno de los meses analizados. Los resultados son coherentes con el funcionamiento normal del sistema de ventilación (que se describe con más detalle en la sección 3.2. de esta memoria) y muestra cómo ambas compuertas se cierran por completo (apertura al 0%) cuando el ventilador de impulsión está parado.

El funcionamiento normal referido hace alusión al comportamiento de las compuertas cuando el ventilador de impulsión está activo. En tal caso, y con suficiente generalidad, se puede afirmar que el sistema de ventilación opera de acuerdo a dos modos básicos, relacionados directamente con la selección de la fuente de aire limpio. Si las condiciones del aire exterior son favorables respecto a la salida de los pozos, la compuerta del conducto del sistema EAHX se cierra por completo (0%) y la del conducto de aire exterior se abre totalmente (100%). Si por el contrario, la admisión de aire a la salida de los pozos es más ventajosa que la del aire exterior, la compuerta del sistema EAHX se abre completamente (100%) y la compuerta del aire exterior se cierra lo máximo permitido (que por criterio del mantenimiento del edificio se ha fijado en un 15% de la máxima apertura).

En los meses de invierno (en los que la carga de ventilación exige calentar el aire limpio del exterior) es obvio que condiciones del aire de admisión a la UTA con una mayor temperatura serán más ventajosas. Las figuras 34 y 35 muestran como en la mayor parte de casos, la temperatura del aire exterior es considerablemente fría y el sistema EAHX, gracias al intercambio de calor con el terreno (que mantiene un nivel térmico moderado más o menos constante durante todo el año), permite obtener aire a la salida de los pozos a temperatura más alta (10-12°C).

No obstante, existen momentos en las horas centrales del día en que la temperatura exterior en este periodo de invierno alcanza valores por encima de esos 12°C (hasta 20°C en días puntuales). En esas situaciones, es más provechoso cerrar la compuerta del aire de los pozos y admitir en la UTA aire procedente directamente del exterior (ver Figura 34.a) hacia la hora 504).

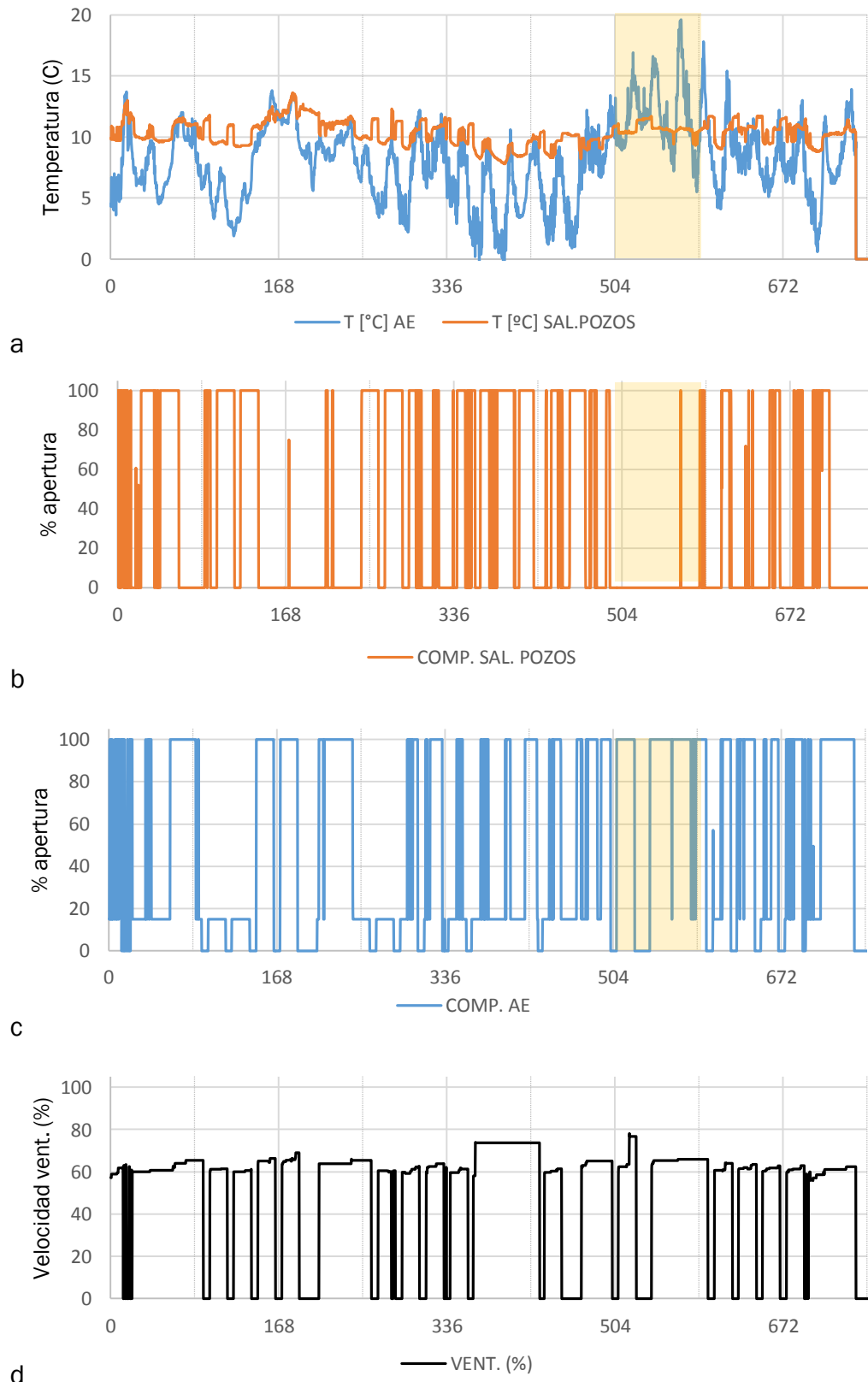


Figura 34. Resultados de la monitorización en periodo de invierno (enero 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador

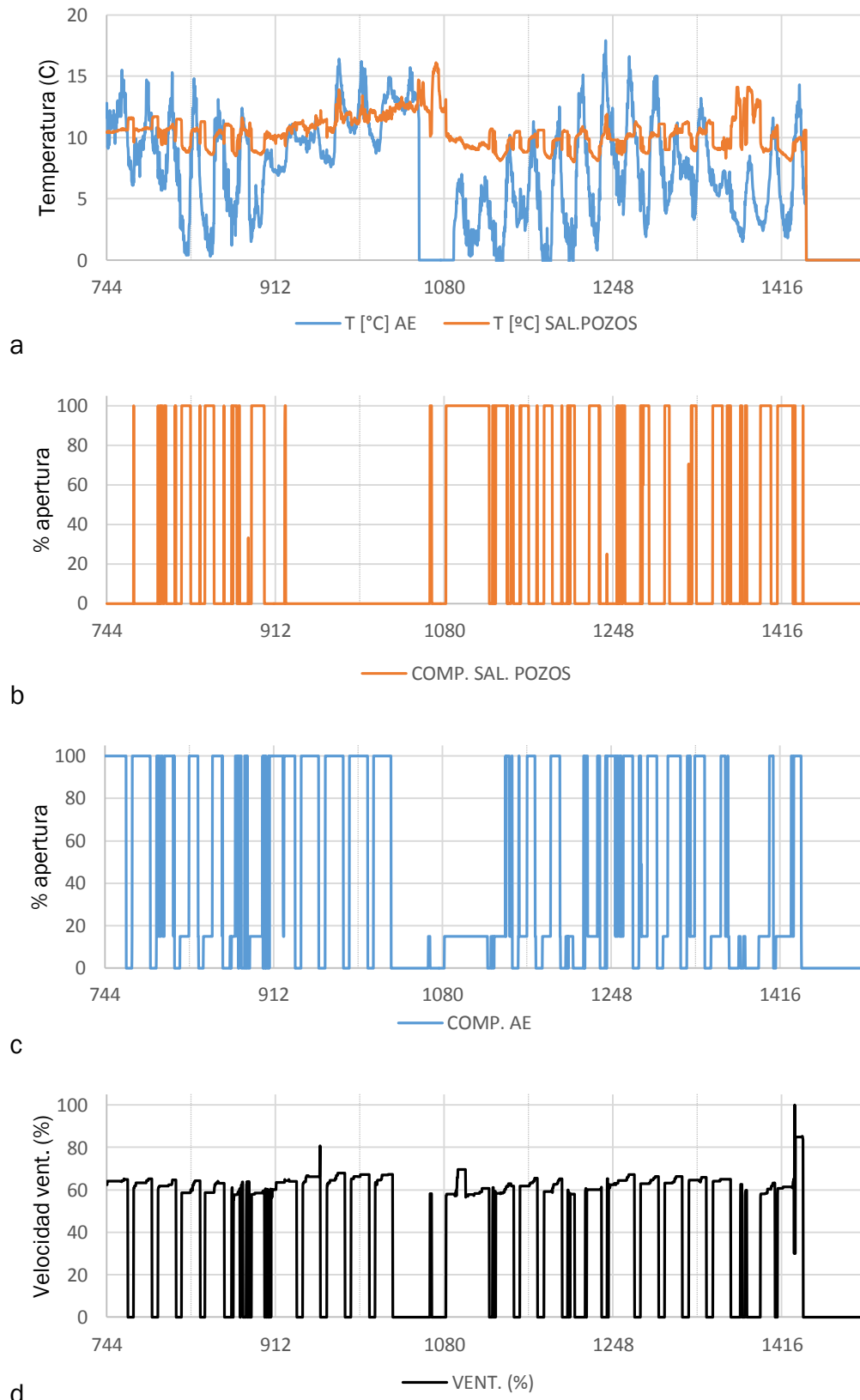


Figura 35. Resultados de la monitorización en periodo de invierno (febrero 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador



3.1.2. Funcionamiento en periodo de VERANO

Los comentarios realizados anteriormente para el periodo de invierno son aplicables al periodo de verano con ligeras modificaciones. El funcionamiento del sistema de ventilación incluyendo el sistema de pozos canadienses sigue la misma filosofía, aprovechando el aire de dichos pozos cuando sus condiciones son más favorables que las del aire exterior.

En el caso de verano, en el cual la carga de ventilación exige enfriar el aire exterior hasta las condiciones de confort interior más frías, será interesante admitir aire a la UTA a una menor temperatura.

Las Figuras 36 y 37 muestran cómo en las horas centrales del día (en las que el edificio está ocupado y demanda ventilación) en los meses de julio y agosto de 2015, la temperatura exterior alcanzó valores entre 30 y 40°C de forma habitual. Sin embargo, gracias al intercambio con el terreno, el sistema EAHX fue capaz de proporcionar aire limpio a una temperatura mucho más baja próxima a los 22-25°C.

Dada la clara ventaja de estas condiciones sobre las del aire exterior, el sistema de ventilación abre la compuerta del conducto asociado a los pozos durante la práctica totalidad del horario de ocupación. Únicamente durante las primeras horas de la mañana en las que la temperatura del exterior aún es relativamente fresca después de toda la noche, su valor es más bajo que el de la temperatura a la salida de los pozos; y en consecuencia, el sistema toma el aire limpio directamente del ambiente exterior, cerrando la compuerta del conducto de salida de los pozos. La Figura 38 muestra un detalle ampliado de la evolución de las variables monitorizadas durante una semana tipo del mes de agosto. En ella se observa claramente el comportamiento mencionado aquí.

Por último, cabe señalar que el ventilador se mantuvo en un rango de régimen de giro estrecho, cercano al 60 – 65 % de su velocidad máxima.

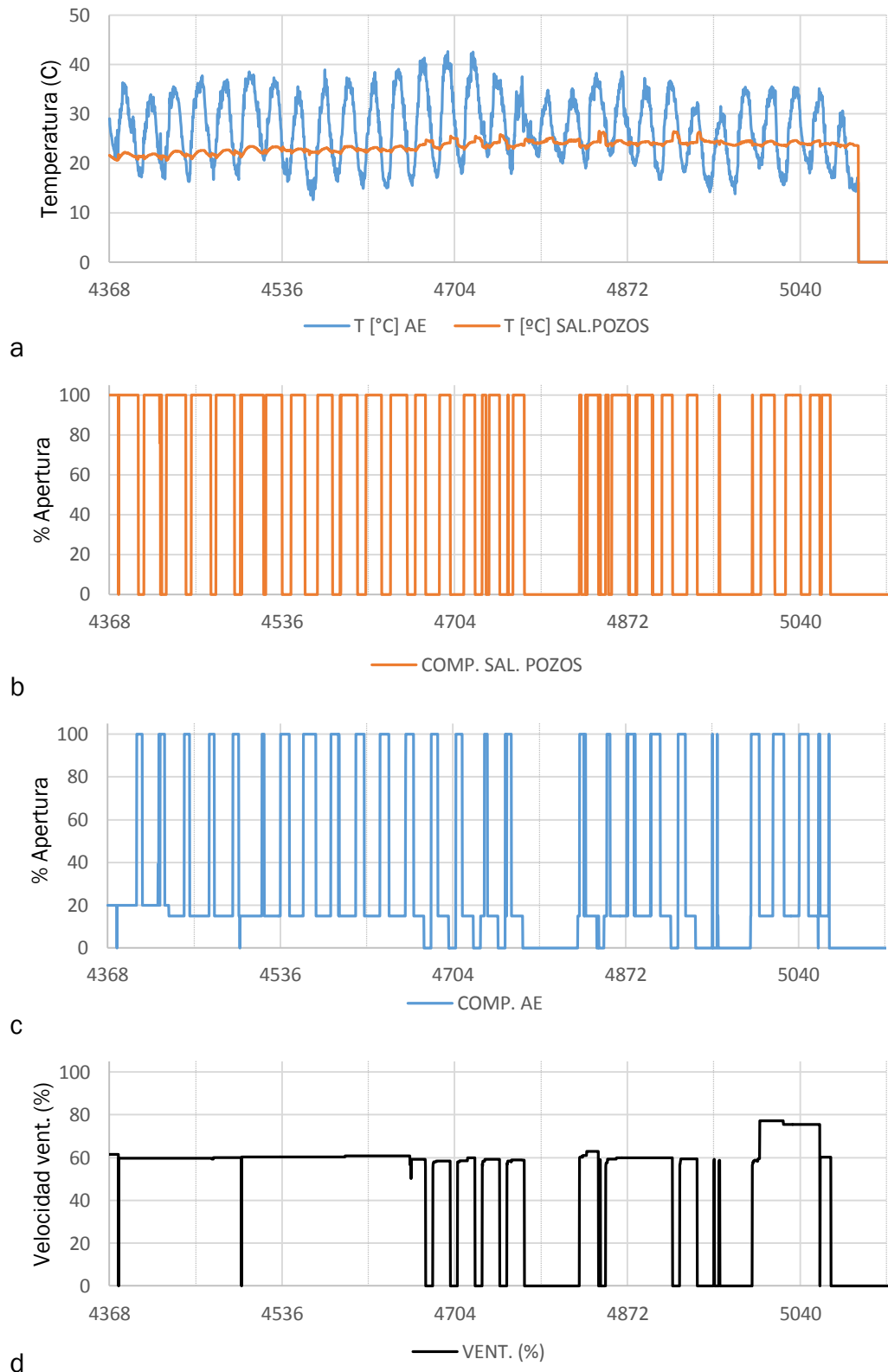


Figura 36. Resultados de la monitorización en periodo de verano (julio 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador

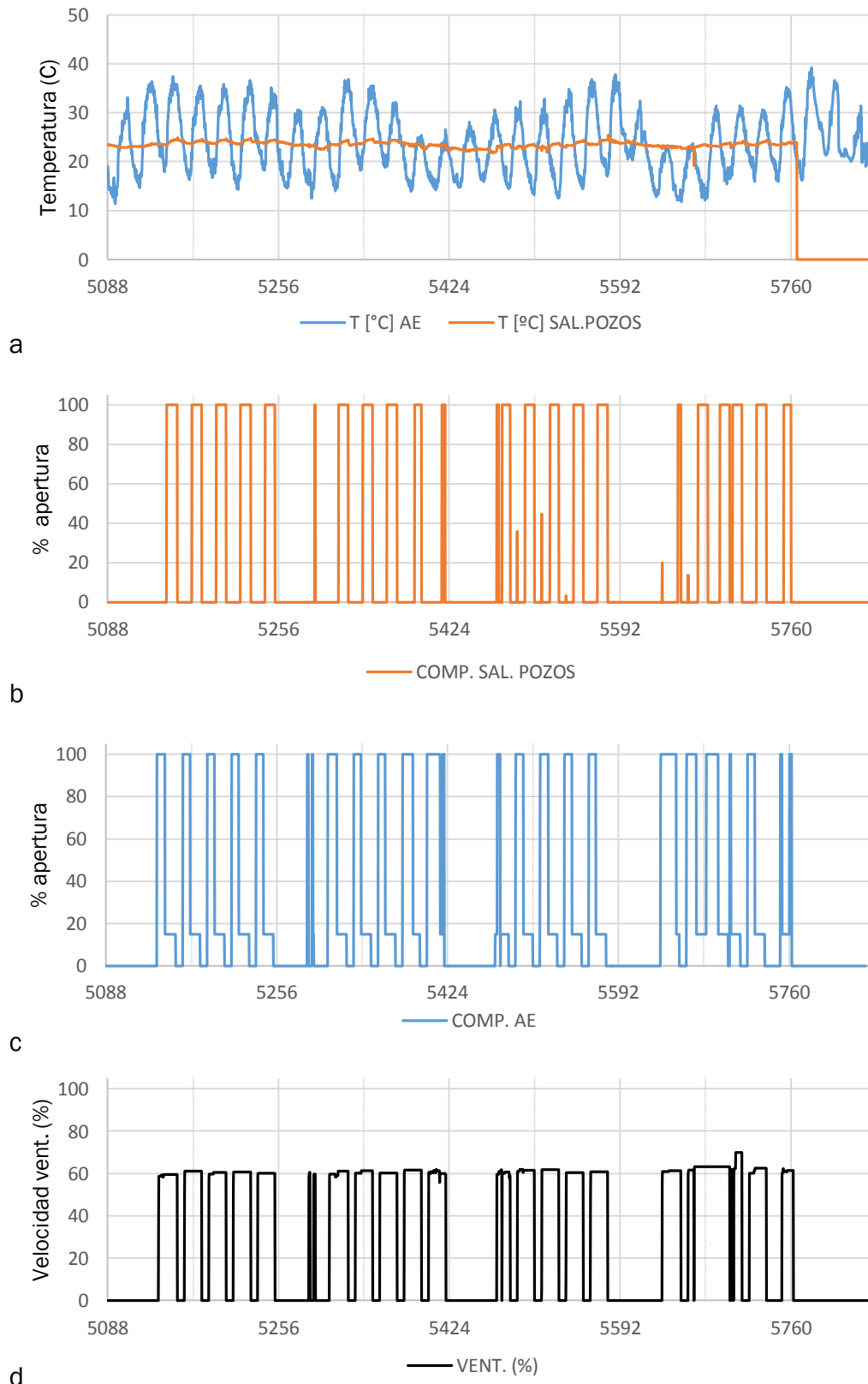


Figura 37. Resultados de la monitorización en periodo de verano (agosto 2016): a) temperaturas del aire, b) y c) % de apertura de compuertas y d) velocidad del ventilador

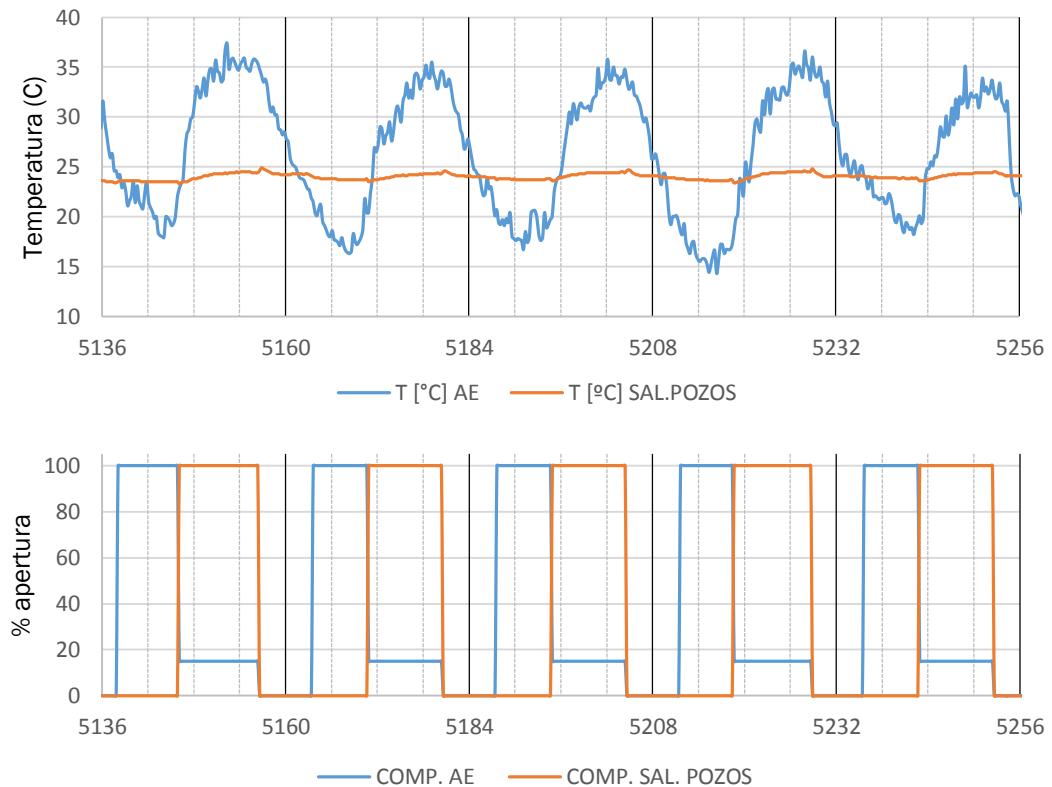


Figura 38. Detalle de las evoluciones de temperatura y apertura de compuertas en una semana tipo del mes de agosto 2016

3.2. Toma de medidas específicas de caudal

Uno de los parámetros determinantes de las prestaciones del sistema de pozos canadienses es el caudal de aire circulante. Por ello, en cualquier análisis de operación del sistema, ya sea a través de su monitorización experimental o de cara a su modelado y simulación, la obtención del valor de este parámetro es indispensable. Para ello, dentro de los trabajos llevados a cabo en este proyecto, se realizaron una serie de medidas in situ de los caudales de aire de operación en el sistema EAHX del edificio LUCIA.

El equipo de medida empleado para realizar estas medidas fue un caudalímetro de aire del tipo Fluke 922 Airflow Meter [21] (ver Figura 39).



Figura 39. Equipo utilizado para la medida de caudales de aire



Se trata de un instrumento de mano para la medida de presión diferencial a través de dos tomas conectables a distintas ubicaciones de la instalación. En particular, dicho instrumento se utilizó conectado a un tubo Pitot capaz de determinar la velocidad del aire en un punto como medida indirecta a partir de la magnitud de la presión estática y dinámica.

A continuación se muestran unas tablas de las especificaciones técnicas y generales de este caudalímetro:

Tabla 1. Especificaciones técnicas del caudalímetro Fluke 922

Especificaciones técnicas	
Presión del aire	Rango/Resolución/Precisión $\pm 4000 \text{ Pa} / 1 \text{ Pa} / \pm 1\% + 1 \text{ Pa}$ $\pm 16 \text{ pulgadas H}_2\text{O} / 0,001 \text{ pulgadas H}_2\text{O} / \pm 1\% + 0,01 \text{ pulgadas H}_2\text{O}$ $\pm 400 \text{ mm H}_2\text{O} / 0,1 \text{ mm H}_2\text{O} / \pm 1\% + 0,1 \text{ mm H}_2\text{O}$ $\pm 40 \text{ mbares} / 0,01 \text{ mbares} / \pm 1\% + 0,01 \text{ mbares}$ $\pm 0,6 \text{ PSI} / 0,0001 \text{ PSI} / \pm 1\% + 0,0001 \text{ PSI}$
Velocidad del aire	Rango/Resolución/Precisión 250 a 16.000 p/min / 1 p/min / $\pm 2,5\%$ de lectura a 2000 p/min (10,00 m/s) 1 a 80 m/s / 0,001 m/s / $\pm 2,5\%$ de lectura a 2000 p/min (10,00 m/s)
Caudal de aire (volumen)	Rango/Resolución/Precisión 0 a 99.999 cfm / 1 cfm / La precisión varía en función de la velocidad y del tamaño del conducto 0 a 99.999 m ³ /hr / 1 m ³ /hr / La precisión varía en función de la velocidad y del tamaño del conducto 0 a 99.999 l/s / 1 l/s / La precisión varía en función de la velocidad y del tamaño del conducto
Temperatura	Rango/Resolución/Precisión 0 °C a 50 °C / $\pm 1\% + 2 \text{ °C} / 0,1 \text{ °C}$ 32 °F a 122 °F / $\pm 1\% + 4 \text{ °F} / 0,1 \text{ °F}$

Especificaciones generales	
Temperatura de trabajo	0 °C a +50 °C (+32 °F a +122 °F)
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a +60 °C (-40 °F a +140 °F)
Humedad relativa	0% a 90%, sin condensación
Grado de protección IP	IP40
Altitud de trabajo	2000 m
Altitud de almacenamiento	12.000 m
EMI, RFI, EMC	Conforme a EN61326-1
Vibraciones	MIL-PREF-28800F, Clase 3
Presión máxima en cada puerto	10 PSI
Capacidad de almacenamiento de datos	99 lecturas
Garantía	2 años
Potencia, vida útil de la batería	4 pilas AA
Duración de la batería	280 horas sin retroiluminación, 60 horas con retroiluminación

Si bien, la utilización del equipo anterior sobre el sistema EAHX no es directa, dadas las particularidades de las características constructivas de la instalación. En este sentido, la Figura 40 muestra un esquema sencillo de la

disposición de los distintos elementos del sistema de ventilación en la sala de calderas del edificio. Se observa que la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) principal, toma el aire bien del sistema de pozos (EAHX) o bien directamente del aire exterior (OA), en unas proporciones determinadas por la posición de las correspondientes compuertas.

Sin embargo, el tramo de conducto correspondiente al aire admitido desde los pozos es demasiado corto y con demasiados elementos que dificultan la medida directa del caudal en cualquier posición a lo largo de él. Por esta razón, se decidió medir el caudal de aire total de mezcla (posición 2) y el caudal de aire en el conducto de aire exterior (OA, posición 1). La diferencia entre ambas medidas permitiría tener una cuantificación del aire que circula por los pozos en distintas condiciones de operación.

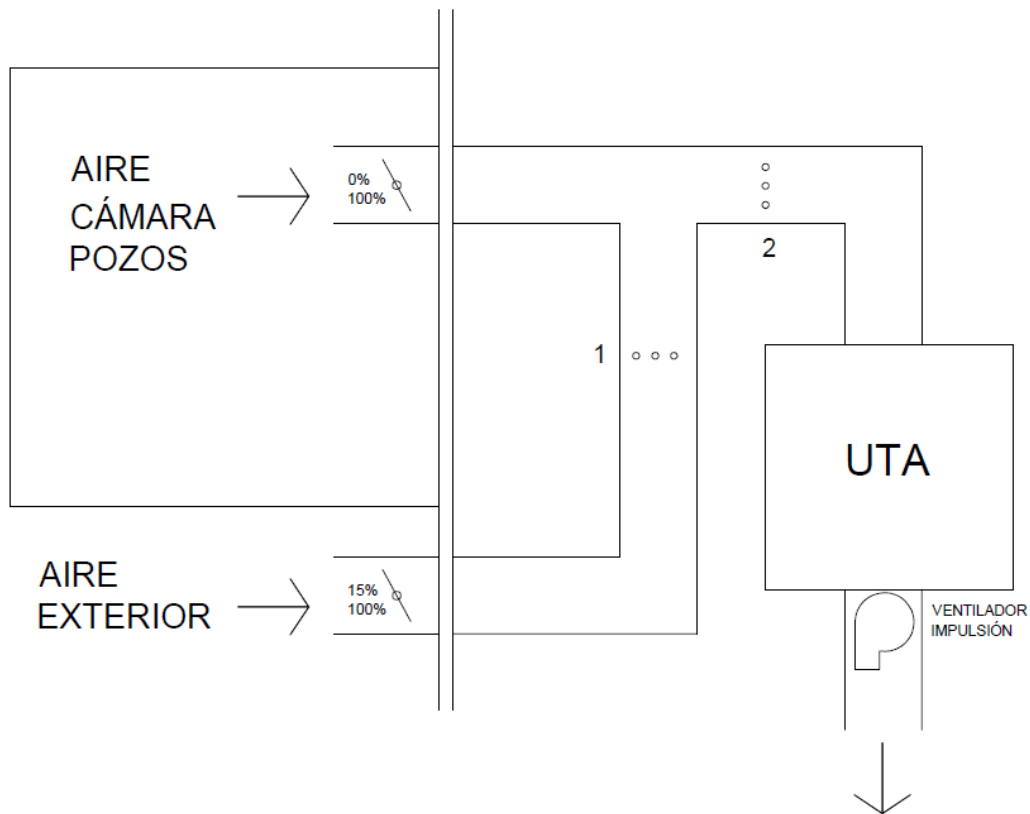


Figura 40. Esquema de principio general de la instalación de ventilación (Edificio LUCIA).

De cara a la toma de medidas con el caudalímetro en las ubicaciones 1 y 2, se realizaron varias perforaciones en los correspondientes conductos: (1-OA) para el aire exterior, y (2- EAHX+OA) para el aire de mezcla de entrada a la UTA. En la Figura 41 se muestran dichas perforaciones en fotografías tomadas in situ en la instalación.

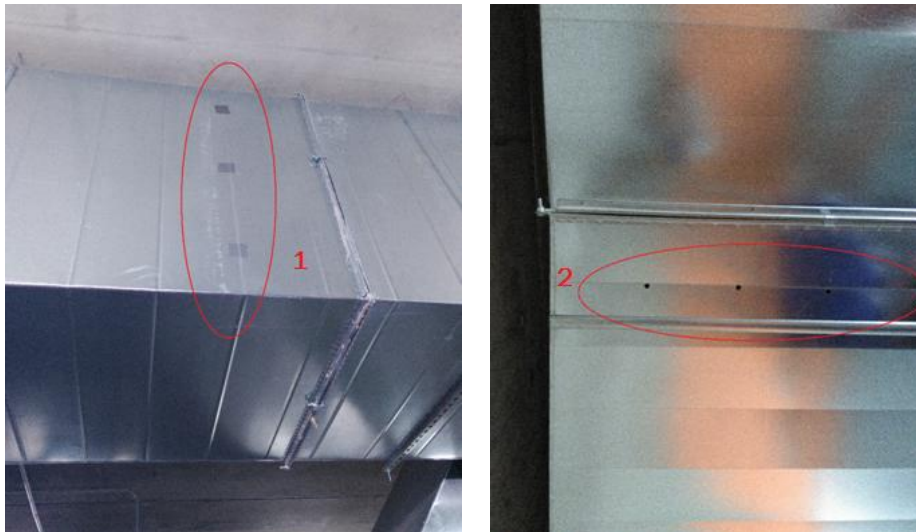


Figura 41. Localización de las perforaciones realizadas en los conductos de aire para la toma de medidas de caudal.

Se debe tener en cuenta cuál es el modo de operación habitual de la instalación de ventilación del edificio LUCIA. A este respecto cabe señalar que la posición de las compuertas de los conductos de aire exterior y aire de los pozos es fijada en función de cuáles son las condiciones más favorables para la admisión de la UTA en cada instante. En general, si el sistema de pozos canadienses es capaz de enfriar/calentar el aire exterior en periodos con demanda de refrigeración/calefacción respectivamente, será interesante admitir aire a la UTA en las condiciones de salida de dicho sistema y no directamente del exterior. Por el contrario, pueden existir situaciones en calefacción/refrigeración en las que el aire del exterior se encuentre más caliente/frío de lo que se obtiene a la salida de los pozos. En tales situaciones será beneficioso tomar aire directamente del exterior y 'omitir' el sistema EAHX.

Pese a que las compuertas, en principio, pueden regular de 0-100% haciendo posible cualquier proporción de caudales hacia la entrada de la UTA, lo cierto es que la operación normal del edificio solo contempla dos posibles casos:

- Si las condiciones del aire a la salida de los pozos son más ventajosas que las del aire exterior, la compuerta en el conducto del sistema EAHX estará abierta al 100% y la del aire exterior se cerrará hasta una posición mínima de 15%.
- Si las condiciones del aire exterior son más favorables que las de los pozos, la compuerta totalmente abierta (100%) será la del conducto del aire exterior, quedando completamente cerrada (0%) la de salida del sistema EAHX.



Es obvio que para el interés de este proyecto, centrado en el análisis del sistema EAHX, el segundo modo de operación en el cual el sistema está desvinculado de la ventilación no es de interés alguno.

Por otra parte, se debe resaltar que la función de las compuertas ya mencionadas es principalmente la de decidir de dónde se toma el aire en cada instante, pero no pretenden regular el caudal de la instalación de ventilación. Para ello se emplea una regulación de la velocidad de giro del ventilador principal de impulsión. Su posición habitual se encuentra en torno a un 65% de su velocidad máxima, si bien, en general se ha considerado un rango de posible modulación entre 30 y 100 %.

Atendiendo a todo lo anterior, se decidió medir el caudal total que circula por el sistema EAHX con la posición de las compuertas correspondientes al primer modo de operación (pozos 100%, aire exterior 15%) y con el ventilador girando a distintos regímenes: 30, 65, 85, 100% de su velocidad máxima. Adicionalmente, se consideró un punto de medida con la compuerta del sistema de pozos totalmente cerrada y el ventilador al 65%. Este caso particular fue realizado en primer lugar con la intención de comprobar que el caudal medido en ambas localizaciones de la instalación (puntos 1 y 2) era aproximadamente el mismo en unas condiciones de trabajo en las que necesariamente debía serlo (al no existir mezcla de corrientes).

Tabla 2. Condiciones de operación (casos) para la medida de los caudales de aire

CASO	% EAHX	% OA	% VENTILADOR
1	0	100	65
2	100	15	65
3	100	15	30
4	100	15	85
5	100	15	100

Por último, antes de presentar los resultados obtenidos, es importante destacar que la medida de velocidad del aire obtenida a partir del Pitot es indicativa de un punto específico dentro de la sección del conducto de aire. En tanto que los perfiles de velocidad reales en tal sección no son homogéneos, la medida de caudal obtenida es muy sensible a la colocación particular del tubo.

Con el objetivo de reducir en lo posible el error asociado a esta dependencia, se tomaron medidas de velocidad en distintos puntos de cada una de las secciones evaluadas, observando el comportamiento de las medidas dentro de la propia sección y tratando de extraer conclusiones a partir de los valores de caudal 'promediados'.

En las figuras 42 y 43 se muestran los puntos de medida empleados en las dos secciones evaluadas. Se pretendió tomar una muestra representativa de ellos, abarcando puntos más y menos próximos a las paredes del conducto, y siempre de acuerdo a las limitaciones de accesibilidad de la propia instalación (por ejemplo, en el conducto de aire de mezcla fue imposible acceder a las secciones superiores y hubo que realizar las perforaciones en la pared inferior y acceder desde ella con el Pitot).

El conducto de aire exterior es un conducto de sección rectangular de 1 m de alto por 0.9 m de ancho. Tal como se muestra en la Figura 42, se tomaron medidas a 15 y 30 cm desde las paredes laterales y a tres alturas diferentes situadas a 15, 50 y 85 cm desde la pared inferior del conducto.

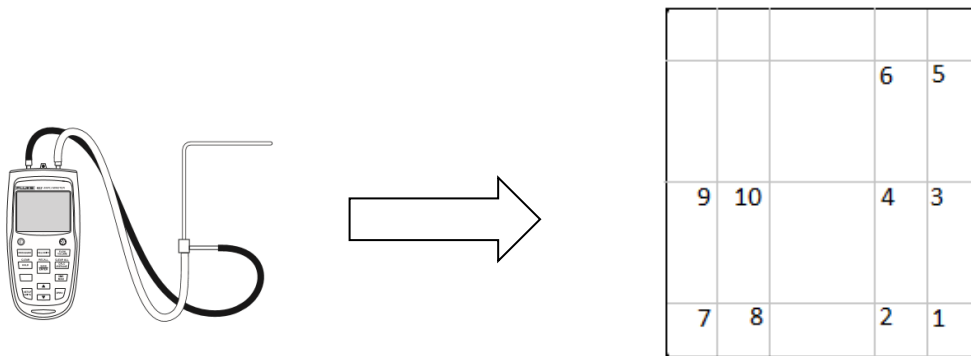


Figura 42. Localización de los puntos de medida con el Pitot en el conducto de aire exterior (posición 1)

El conducto de aire de mezcla es igualmente un conducto de sección rectangular, en este caso de 0.75 m de alto por 1.2 m de ancho. Tal como se muestra en la Figura 43, se tomaron medidas cada 20 cm en la dirección transversal y a dos alturas diferentes situadas a 15 y 30 cm desde la pared inferior del conducto.

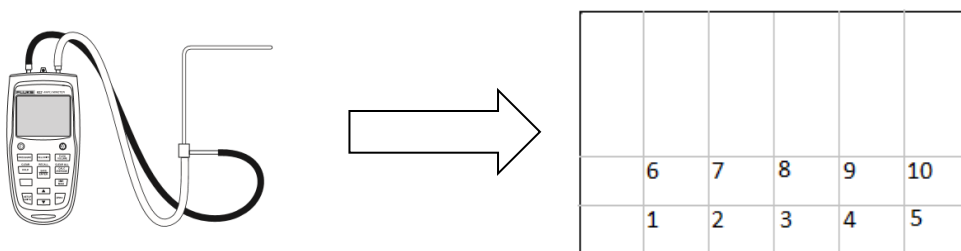


Figura 43. Localización de los puntos de medida con el Pitot en el conducto de aire de mezcla (posición 2)

A continuación se presentan y comentan los resultados derivados de las medidas experimentales realizadas in situ sobre la instalación de ventilación del edificio LUCIA:

En primer lugar, se muestran las medidas tomadas en el caso de que la compuerta del sistema de pozos se encuentre totalmente cerrada.

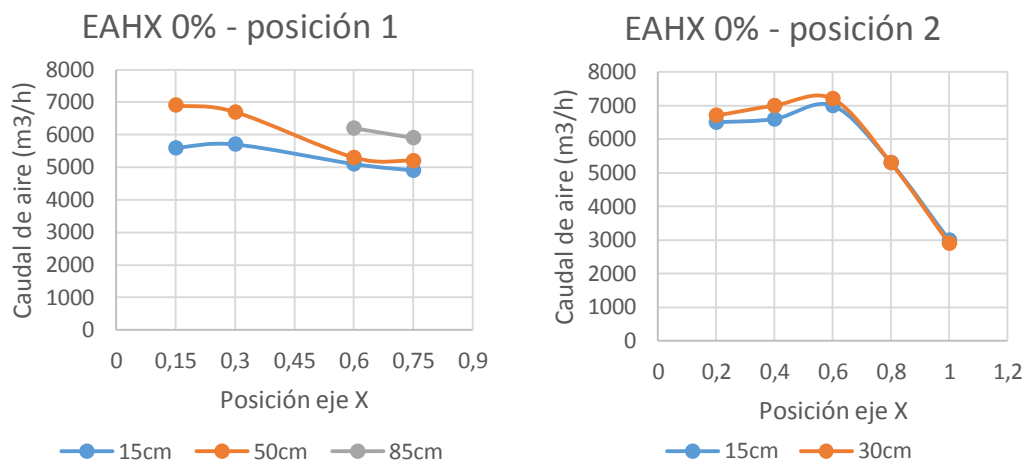


Figura 44. Caudales de aire medidos con la compuerta del sistema EAHX cerrada (0%) en la posición 1 (a) y en la posición 2 (b).

Se puede observar que el caudal medido (derivado de los valores de velocidad correspondientes) difiere sensiblemente en función del punto exacto de medida dentro de la sección. Especialmente, se aprecian valores muy reducidos junto a la pared derecha del conducto del aire de mezcla (Figura 44. (b)). Esto es coherente con la disposición real de la instalación y se debe al codo existente inmediatamente aguas arriba de la posición 2. Debido a dicho codo, el aire tiende a pasar por el exterior (junto a la pared izquierda) de la sección, creándose una zona de baja velocidad en la parte interior.

Es evidente que este efecto debe tratarse de evitarse midiendo en tramos rectos de conducto suficientemente alejados de esta y otras singularidades. Sin embargo, en este caso concreto, la instalación real no ofrece alternativas mejores y debe asumirse el error asociado.

Teniendo en cuenta estas apreciaciones, podría decirse que el caudal promedio medido en ambas secciones (1 y 2) se sitúa aproximadamente en torno a los 5500 - 6000 m³/h. Esto es coherente con lo esperado al tener totalmente cerrada la compuerta de los pozos. Si bien, se pone de manifiesto que las medidas derivadas de este procedimiento experimental van a estar caracterizadas por una variabilidad muy importante, lo cual supone una limitación sobre la calidad de los datos extraídos.

En cualquier caso, el objetivo fundamental del trabajo mostrado en este apartado es la estimación del orden de magnitud del caudal de aire con el que trabaja el sistema EAHX del edificio LUCIA durante su operación normal, de forma que las simulaciones energéticas planteadas más adelante puedan tratar de analizar el sistema en unas condiciones de funcionamiento



similares. Para ello, aunque sería ideal contar con medidas de caudal más precisas y fiables, se ha considerado suficiente esta primera aproximación.

- **PUNTO 1: Conducto de aire exterior (OA) de 1 m x 0.9 m**

A continuación, la Figura 45 presenta todos los resultados derivados de la medida de caudales de aire en la sección de aire exterior (1) para distintas velocidades del ventilador con la compuerta de aire del sistema EAHX abierta.

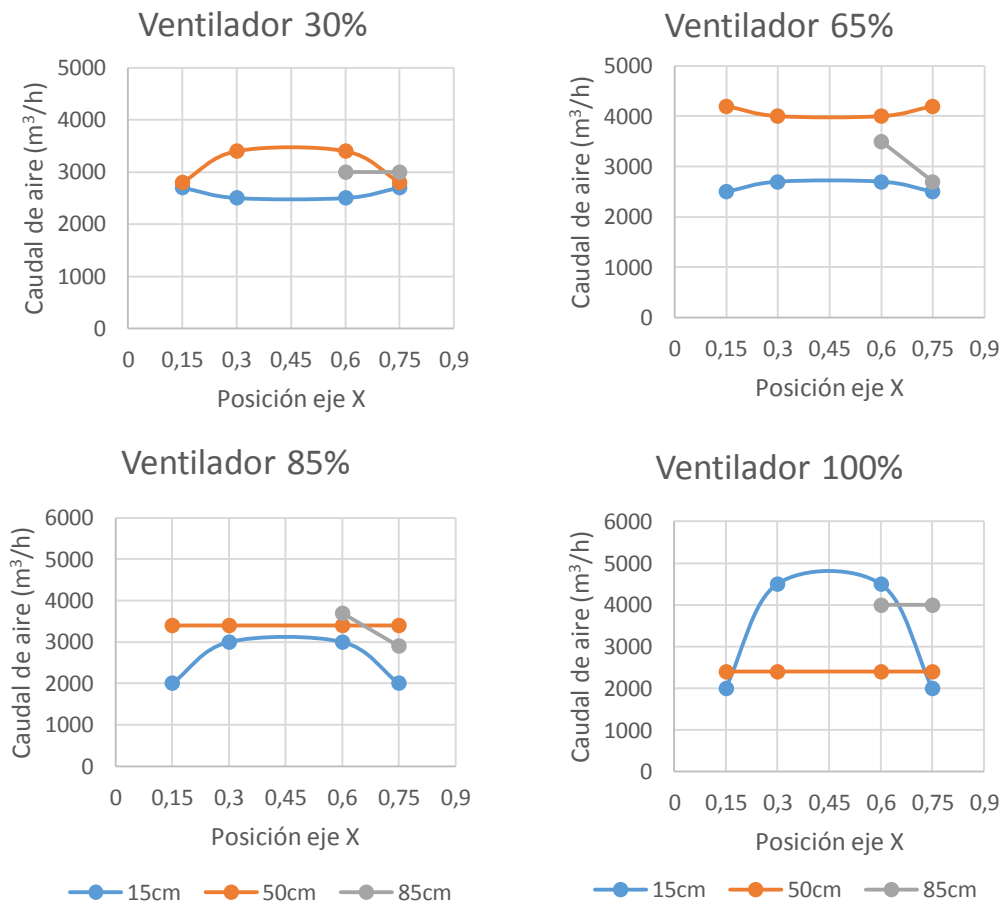


Figura 45. Caudales de aire medidos en el conducto OA (pos.1) con la compuerta del sistema EAHX abierta (100%) y distintos regímenes del ventilador

Tal como se ha comentado, debido a la gran variabilidad de los datos disponibles es complicado extraer conclusiones firmes del comportamiento observado. En general, se aprecian caudales de aire exterior no muy variables que oscilan entre unos promedios de 3500 – 4000 m³/h.

Los valores numéricos resultantes considerados en las distintas medidas realizadas se muestran adicionalmente en la Tabla 3.

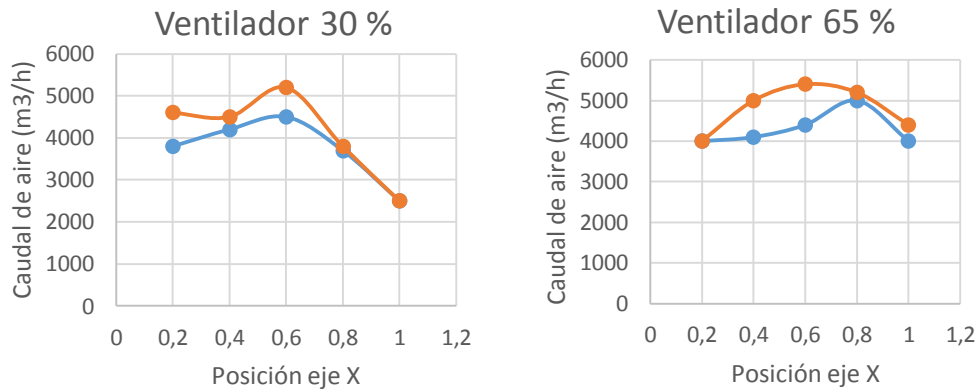


Tabla 3. Medidas de caudal (m^3/h) en el conducto de aire exterior (posición 1)

X (m)	Punto	Régimen del ventilador (%)			
		30	65	85	100
0,15	7	2700	2500	2000	2000
0,30	8	2500	2700	3000	4500
0,60	2	2500	2700	3000	4500
0,75	1	2700	2500	2000	2000
0,15	9	2800	4200	3400	2400
0,30	10	3400	4000	3400	2400
0,60	4	3400	4000	3400	2400
0,75	3	2800	4200	3400	2400
0,60	6	3000	3500	3700	4000
0,75	5	3000	2700	2900	4000

- **PUNTO 2: Conducto de aire de mezcla (EAHX+OA) de 0.75 m x 1.20 m**

A continuación, la Figura 46 presenta todos los resultados derivados de la medida de caudales de aire en la sección de aire de mezcla (2).



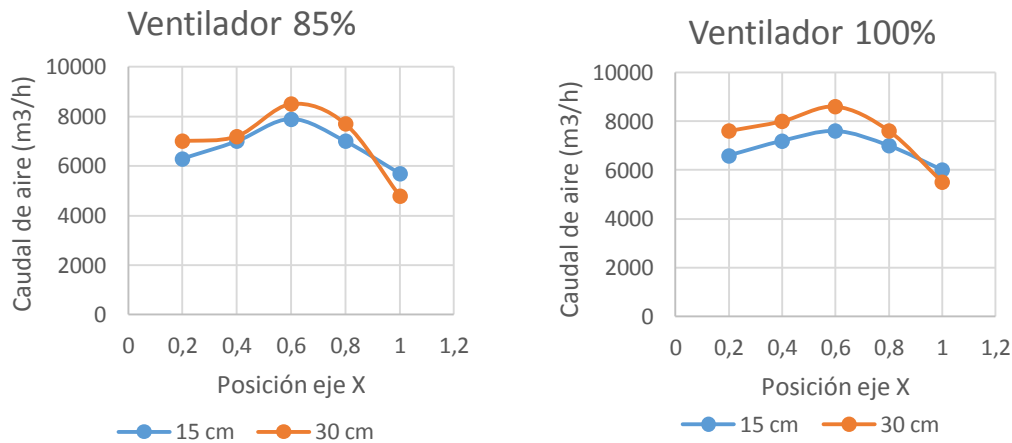


Figura 46. Caudales de aire medidos en el conducto de aire de mezcla (pos.2) con la compuerta del sistema EAHX abierta (100%) y distintos regímenes del ventilador

Análogamente a lo presentado para la posición 1, la Tabla 4 muestra los valores numéricos derivados de las lecturas tomadas en este conducto:

Tabla 4. Medidas de caudal (m^3/h) en el conducto de aire exterior (posición 2)

X (m)	Punto	Régimen del ventilador (%)			
		30	65	85	100
0,2	1	3800	4000	6300	6600
0,4	2	4200	4100	7000	7200
0,6	3	4500	4400	7900	7600
0,8	4	3700	5000	7000	7000
1	5	2500	4000	5700	6000
0,2	6	4600	4000	7000	7600
0,4	7	4500	5000	7200	8000
0,6	8	5200	5400	8500	8600
0,8	9	3000	3500	7700	7600
1	10	3000	2700	4800	5500

Una vez más, pese a la gran variabilidad de los datos, se puede apreciar una tendencia clara en el sentido de mayores niveles de caudal conforme aumenta la velocidad de giro del ventilador. Desde valores promedio en el entorno de los 4000 - 4500 m^3/h para el régimen de giro más bajo (30%) hasta valores promedio cercanos a los 7500 - 8000 m^3/h para el máximo régimen de giro (100%).

En esta posición de la instalación, estos caudales son resultado de la mezcla del aire que entra desde la toma directa de aire exterior y la que entra desde la precámara a la que descargan los tubos horizontales del intercambiador enterrado. Por tanto, el caudal que realmente atraviesa los tubos del sistema



de pozos (que es el dato de interés aquí) puede obtenerse por diferencia con la información derivada de las medidas en la posición 1.

En resumen, sin ser capaces de obtener una caracterización detallada del caudal que circula por la instalación para cada régimen del ventilador, al menos este procedimiento experimental sí que aporta una idea del orden de magnitud que toma dicho caudal en la operación normal del sistema. Podría señalarse que el caudal total que atraviesa los tubos del sistema EAHX varía entre unos 500 – 1000 m³/h para la posición más baja del ventilador (30%) hasta unos 4500 – 5000 m³/h para la posición más alta (100%).



Capítulo 4. Modelado del sistema



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario





4.1. TRNSYS como herramienta de simulación

TRNSYS (*Transient Energy Simulation Tool*) es un completo entorno de simulación dirigido a todo tipo de sistemas dinámicos, incluyendo edificios multizona [22]. Se trata de un software empleado por ingenieros e investigadores de todo el mundo para la validación de conceptos innovadores en el ámbito de la energía, siendo capaz de simular desde sencillos sistemas hasta el comportamiento de edificios complejos con todo su equipamiento, estrategias de control, características de ocupación, sistemas de energías alternativas, etc.

La característica esencial de este software es su estructura modular, que le dota de una gran versatilidad y posibilita el tratamiento de prácticamente cualquier sistema energético que requiera una simulación dinámica. TRNSYS reconoce un lenguaje descriptivo en el cual el usuario especifica los componentes que constituyen el sistema global y la forma en que estos están conectados. Las distintas partes de un sistema están modeladas de forma individual en 'componentes' abiertos a la interrelación con otros componentes del sistema mediante el intercambio de datos.

Las librerías disponibles contienen los modelos de una gran variedad de elementos habitualmente presentes en sistemas energéticos, así como otra serie de componentes que contienen rutinas que permiten manejar datos climatológicos y otros tipos de funciones de entrada dependientes en el tiempo además de facilitar el procesamiento de los resultados de las simulaciones.

La capacidad de este software de simulación es aún mayor teniendo en cuenta que no se limita al grupo de componentes definidos en sus librerías (los cuales por sí mismos ofrecen una gran variedad de posibilidades), sino que la arquitectura del programa permite a los usuarios desarrollar componentes con modelos personalizados mediante lenguajes de programación habituales (C, C++, PASCAL, FORTRAN, etc.). Del mismo modo, TRNSYS puede interaccionar con otras aplicaciones (Excel, Matlab, etc.) para el pre- o post-procesado de datos o incluso durante el transcurso de las simulaciones.

Por último, cabe mencionar que el entorno TRNSYS está compuesto por un paquete de varios programas:

- El programa básico para la definición de nuevos proyectos de simulación y sus características principales: *TRNSYS Simulation Studio*
- El motor de cálculo y su ejecutable (*TRNDll.dll* y *TRNExe.exe*)
- La interfaz visual para la entrada de datos de los modelos de edificios (*TRNBuild*)



- El *Editor TRNEdit* para la creación de nuevos componentes personalizados (aplicaciones TRNSED)

4.2. Modelo de un intercambiador de calor enterrado horizontal

El componente 'Type997' implementa un intercambiador de calor enterrado el cual consiste en una o más capas de tubos horizontales que interactúa térmicamente con el suelo. Un fluido, en este caso aire, se hace circular a través de las tuberías y rechaza o absorbe el calor de la tierra circundante, dependiendo de la temperatura local de este último. Además de soportar múltiples capas de tubos, también puede modelar múltiples capas distintas de suelo, una capa aislante y la zona superficial de arriba y enterradas a los lados del intercambiador de calor y una capa de agua subterránea que penetra el suelo alrededor de las tuberías (la cual no se ha tenido en cuenta para la realización del modelo). Cada tubo puede estar conectado o enlazado a otro tubo externamente, aunque este no es el caso. Un método flexible para definir la trayectoria de flujo en la red de tuberías paralelas permite al usuario configurar la opción deseada: n tubos en paralelo, un único tubo de serpentín, m tubos de serpentín, etc. Aunque en este estudio se modela un intercambiador de calor de tierra acoplado horizontalmente con una entrada, una salida y varias capas de tubos.



Figura 47. Ejemplo de una posible configuración de los tubos del intercambiador de calor enterrado de tubos horizontales

Estos intercambiadores están dispuestos generalmente con tubos espaciados al menos 1,5 metros de distancia y por lo menos 1,20-1,80 metros de profundidad. Esto minimiza la interferencia térmica entre los tubos, pero todavía somete a los tubos a efectos de la radiación solar, que afecta a la temperatura del suelo. Esta radiación afecta al cambio cíclico en la temperatura de la superficie y se incrementa por la presencia de las aguas subterráneas y la disminución de la profundidad. La colocación del intercambiador de calor más profundo reduce estos efectos, pero aumenta los costos de instalación y operación.



Asimismo cada capa del intercambiador de calor consiste en el mismo número de tubos espaciados uniformemente de idéntica longitud, aunque los laterales no necesitan ser uniformemente distribuidos verticalmente. La transferencia de calor desde la superficie del suelo a los alrededores (ya sea directamente al medio ambiente o a través del aislamiento a una zona de acondicionado) se produce por radiación y convección. El suelo que interactúa térmicamente con los tubos del intercambiador de calor se divide en una malla 3-D, utilizando un enfoque de diferencias finitas totalmente implícito.

Las diferentes condiciones de contorno posibles se pueden aplicar para resolver simultáneamente el gradiente de temperatura del suelo, las tasas de transferencia de calor, las tasas de almacenamiento de energía, y las temperaturas de salida de fluido. Los datos de temperatura del suelo se exportan de un archivo externo, en este caso se emplea la climatología de la provincia de Valladolid. En aras de la velocidad de simulación, el modelo rompe el suelo a lo largo de dos ejes de simetría (en las direcciones x e y) y simula solamente un cuarto del campo, la multiplicación de los resultados de transferencia de energía para llegar al efecto total.

Descripción matemática

A continuación se presentan los fundamentos matemáticos y de funcionamiento de los principales componentes empleados en la modelización de los casos de estudio planteados en este trabajo y que se describirán más adelante.

Los modelos de programas de un intercambiador de calor geotérmicos horizontales pueden utilizar aislamiento perimetral vertical usando un esquema de diferencias finitas totalmente implícitas. Una zona con aislamiento opcional situado en la parte de arriba del intercambiador de calor también puede ser incluido. Todas las propiedades de los materiales se suponen constantes y se deben introducir. Se utiliza primero datos de la geometría proporcionada por el usuario y las ubicaciones de contorno de simulación para crear una malla 3D de la tierra utilizando nodos hexaedros con superficies rectangulares. Este sistema genera nodos más pequeños cerca de las áreas de interés, tales como los límites entre las tuberías, el suelo, las aguas subterráneas, el aislamiento y la superficie, y los nodos más grandes en las zonas menos preocupantes cerca de los límites de simulación.

Se establece entonces en cada nodo los balances energéticos diferenciales. Sólo la conducción hacia y desde los nodos de almacenamiento y vecinos se consideran en los balances de los nodos que no son de contorno. Cada capa de aislamiento vertical se modela infinitamente delgada, y por lo tanto forma un plano límite entre los conjuntos rectangulares vecinas de los nodos del suelo. El aislamiento se puede ajustar para modelar diferentes



combinaciones de materiales y espesores, y se trata como una resistencia de contacto en serie con la resistencia conductiva entre nodos aplicables.

El campo lejano y las condiciones de contorno del borde profundo se deben especificar, ya que diferentes modos pueden ser seleccionados. La condición de frontera de tierra también debe ser elegida. Los modos disponibles son el balance de energía con la convección y la radiación, la temperatura superficial en función del tiempo, o temperatura de la superficie fija. Además, una zona acondicionado y / o aislamiento se puede colocar por encima del dominio de simulación, que divide básicamente el campo en dos condiciones de contorno separadas. Los parámetros para la zona pueden estar relacionados con la construcción de modelos multizona o la construcción de modelos simplificados en TRNSYS. Existe una red de resistencia térmica cilíndrica que se utiliza para establecer un balance de energía del fluido a través de los tubos a los nodos de suelo que contiene segmentos de tubería (descritas a continuación), lo que permite la aplicación de la condición de frontera de entrada de fluido proporcionado por el usuario y la solución del problema. Es importante tener en cuenta que el usuario introduce la dirección, la fuente y destino de cada tubo de entrada y salida, ya sea a / de otro tubo o a / de una fuente externa. Como el esquema utilizado es totalmente implícito, la temperatura de cada nodo en la simulación y sus tasas de transferencia de calor asociado son iterativamente y al mismo tiempo computado a una tolerancia también determinado por el usuario para cada paso de tiempo de la simulación.

Proceso de mallado

El dominio computacional global para el problema es un prisma rectangular y se muestra a continuación. Nótese que cada capa de tubos consiste en el mismo número de tubos espaciados uniformemente de la misma longitud, por lo que el intercambiador de calor tiene superficies delimitadoras verticales. Los ejes están orientados de acuerdo a la regla de la mano derecha con el origen en la esquina superior izquierda trasera del dominio de simulación. Siguiendo esta terminología direccional, los puntos con coordenadas "x" más pequeñas y más grandes que los bordes verticales transversales de las capas de tubos se designan a la "izquierda" y "derecha" del intercambiador de calor, respectivamente. Del mismo modo, los puntos con coordenadas más pequeñas y más grandes que los bordes verticales axiales están designados para la "detrás" y "delante", respectivamente, y los que tienen coordenadas z más pequeño y más grande que las superficies horizontales del intercambiador de calor están designados a la "superior" e "inferior", respectivamente.

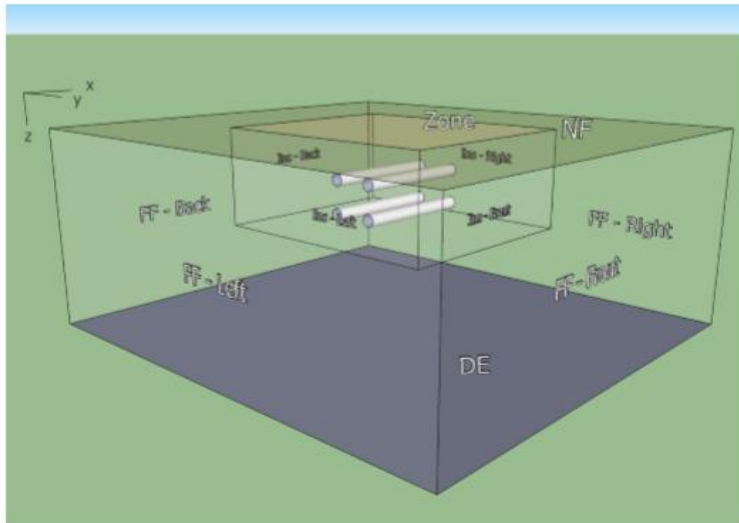


Figura 48. Planteamiento general del dominio de cálculo del modelo

El procedimiento de mallado requiere que el usuario proporcione parámetros que especifiquen el número de tubos por capa, el número de capas de tubería, el número, profundidades y espesores de las capas del suelo, la capa de agua subterránea, las distancias entre los bordes de la capa de aislamiento de tuberías, las capas, los límites de campo lejano y los límites de la tierra de profundidad. El número de nodos de igual tamaño que abarca la longitud de los tubos, una dimensión mínima de nodo, un multiplicador de crecimiento dimensión nodo y un factor de nodo que contiene el tubo, también se debe suministrar.

El componente 'Type997' genera una malla 3-D de nodos rectilíneos: caras opuestas de un único nodo tienen geometrías idénticas. Además, cada uno de las seis superficies de un nodo debe ser tangente a una sola superficie de otro nodo vecino. Por lo tanto, estas caras tienen que compartir necesariamente las mismas dimensiones y todos los nodos a lo largo de una recta cualquiera que tenga al menos dos dimensiones idénticas. Como resultado, el balance de energía en cada nodo describe la iteración entre el nodo y otros seis nodos o superficies límite del sistema (hay que tener en cuenta que un nodo puede interactuar con un máximo de 3 superficies límite si encuentra en una esquina del dominio de simulación). Los límites verticales son campo lejano, parte trasera y delantera.

La siguiente figura representa la vista en planta de un mallado de nodo de dos capas, representando un intercambiador de calor con cuatro tubos, con aislamiento perímetro vertical frontal y parte trasera:

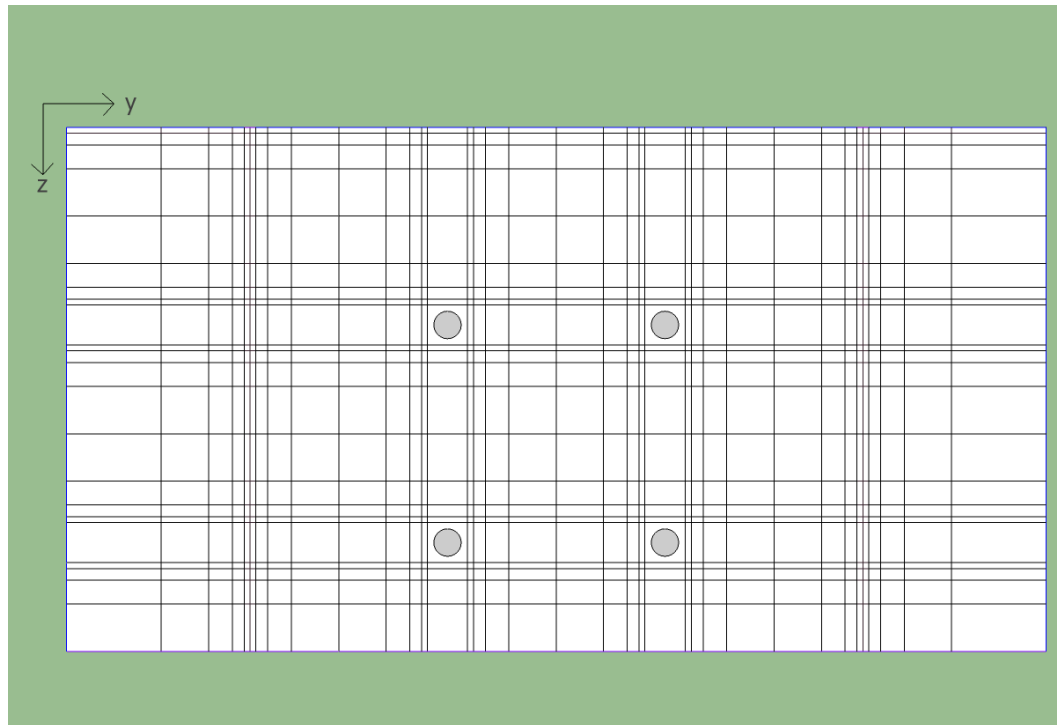


Figura 49. Vista en planta de malla nodo de dos capas, intercambiador de calor con cuatro tubos con aislamiento perímetro vertical frontal y parte trasera

Es importante tener en cuenta que en los conjuntos de rutina del programa son: las dimensiones x de todos los nodos se establecen primero, a continuación, sus dimensiones y , y finalmente, los z . Para cada dimensión, los nodos adyacentes a las fronteras entre las diferentes regiones de interés han de establecerse en los nodos de dimensiones mínimas, a menos que el nodo contenga un tubo. Por lo tanto, cuanto más lejos se encuentra un nodo de un área de interés, mayor será su volumen. En ausencia de aislamiento perimetral, los ejes x e y se expandirán de forma continua a partir de dimensiones mínimas adyacentes a los nodos de tubería hacia el tamaño máximo de los límites del sistema.

4.3. Planteamiento del modelo general en TRNSYS Studio

Cualquier modelo matemático empleado por TRNSYS está habitualmente implementado en módulos individuales que deben conectarse entre sí (en base a relaciones entre sus variables de entrada y salida) dentro de un 'proyecto' o 'modelo general' de simulación que será más o menos complejo dependiendo de los elementos que intervengan en la instalación o en la simulación a realizar.

A continuación se muestra un sencillo ejemplo de modelo general preparado para llevar a cabo el apartado de análisis de sensibilidad del modelo (ver sección 4.4). Se puede observar que el modelo correspondiente al intercambiador de calor enterrado (Type 997) se conecta con otros módulos,

en este caso, el módulo climático Type 15-6, en el cual se introducen los datos climáticos de una ciudad a través de un archivo externo y el módulo gráfico Type 65c, con el que se puede visualizar la evolución gráfica de los resultados.

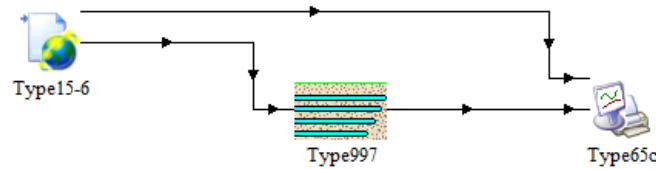


Figura 50. Ejemplo de modelo generado en TRNSYS Studio

La Tabla 5 muestra los principales parámetros del módulo Type 997, que son relevantes para el desarrollo de las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo. Conviene resaltar en este punto la diferencia entre ‘parámetros’ y ‘variables’ en cualquier módulo empleado en TRNSYS: Parámetros son aquellas magnitudes que permanecen constantes a lo largo de toda una simulación, mientras que variables son magnitudes que van variando su valor en el tiempo y por tanto, en los distintos pasos de una simulación.

Todas las magnitudes mostradas en la tabla siguiente son parámetros del Type 997, cuyo valor será escogido en este trabajo como común para todos los estudios de simulación desarrollados y presentados más adelante.

Para un mejor entendimiento, se podrían clasificar estos parámetros principales en tres grupos:

- Parámetros relativos a la geometría del sistema y las características de la instalación (tubo, etc.). Se muestran en un tono rojizo.
- Parámetros relativos al mallado del dominio. Se muestran en color azul.
- Propiedades termofísicas del terreno y del fluido caloportador, en verde.

Tabla 5. Parámetros principales

	Nombre	Valor	Unidad
1	Número de tubos en cada capa	17	-
2	Número de capas de tubos	3	-
3	Número de capas de suelo	1	-
4	Nodos a lo largo del eje del tubo	10	-
5	Longitud del tubo	16.7	m
6	Diámetro interior del conducto	0.25	m
7	Diámetro exterior del conducto	0.27	m
8	Conductividad térmica del conducto	1.8	kJ/(hr·m·K)
9	Resistencia de contacto del conducto con el suelo	0	(hr·m ² ·K)/kJ
10	Separación de tubo horizontal	0.95	m
11	La profundidad de la tubería de capa 1	2.02	m
12	La profundidad de la tubería de capa 2	2.72	m
13	La profundidad de la tubería de capa 3	3.42	m



Tabla 5 (cont.). Parámetros principales

Nombre	Valor	Unidad
14 Distancia a frontera lateral: superficie izquierda	10	m
15 Distancia a frontera lateral: superficie derecha	10	m
16 Distancia a frontera lateral: superficie delantera	10	m
17 Distancia a frontera lateral: superficie trasera	10	m
18 Distancia a frontera profunda	10	m
19 Temperatura del fluido inicial	12	C
20 Calor específico del fluido	1.008	kJ/(kg·K)
21 Densidad del fluido	1.2	Kg/m ³
22 Conductividad térmica del fluido	0.24	W/(m·K)
23 Viscosidad del fluido	0.000018	N.s/m ²
24 Conductividad térmica de la capa de suelo	31.3992	kJ/(hr·m·K)
25 Densidad de la capa de suelo	3200	Kg/m ³
26 Calor específico de la capa de suelo	0.84	kJ/(kg·K)
27 Espesor de la capa de suelo	1000	m
28 Temperatura de tierra profunda (superficie promedio)	21.11	C
29 Tamaño más pequeño de nodo	0.2	m
30 Multiplicador del tamaño de nodo	4	-
31 Factor de longitud	1	-
32 Multiplicador sobre el diámetro de la tubería de tamaño de los nodos	2.5	-
33 Emisividad de la superficie del suelo	0.9	-
34 Absorción de la superficie del suelo	0.3	-

Por otra parte, en lo relativo a las variables de entrada que son relevantes para la simulación de sistema EAHX, cabe destacar el caudal de aire circulante y la temperatura del aire de entrada (coincidente con la temperatura exterior). Por su parte, la variable de salida de mayor interés será la temperatura del aire a la salida de los pozos, que determinará la magnitud del pre-acondicionamiento logrado en el aire de ventilación y el consiguiente ahorro energético.

4.4. Análisis preliminar de sensibilidad del modelo

A la hora de utilizar un modelo matemático como el implementado en el Type 997 de TRNSYS, es fundamental entender sus características y la influencia de los parámetros característicos involucrados. Este aspecto es aún de mayor relevancia en modelos de diferencias finitas, elementos finitos, etc. en los que interviene una discretización del dominio de cálculo y en los que el modo en que se haga dicha discretización influye de forma muy importante en los resultados obtenidos y en el tiempo de cálculo empleado para su obtención. Este es el caso particular del modelo aquí utilizado.

Para entender cómo afecta la discretización del dominio, en este trabajo el primer paso planteado consistió en la realización de un análisis preliminar de sensibilidad del modelo ante la variación de los principales parámetros relativos al mallado. En concreto: tamaño del dominio de cálculo (definido por las distancias hasta las fronteras laterales y profunda, referidas en la tabla



anterior por los parámetros número 14 -15-16-17-18), tamaño del nodo más pequeño (referidas en la tabla al parámetro 29) y multiplicador de ese tamaño de nodo (referidas en la tabla al parámetro 30).

Para ello, se propuso un caso de estudio de referencia en el que estudiar la variación de los resultados en función de dichos parámetros. Este caso de referencia consiste en una simulación de un mes del periodo de invierno (febrero) con los datos climatológicos de la zona climática D2 de acuerdo al Código Técnico de la Edificación (CTE), en la cual se encuentra ubicada la ciudad de Valladolid.

Ante la indefinición de unas propiedades térmicas del subsuelo determinadas, para este caso de referencia se tomaron los datos por defecto propuestos por TRNSYS. Igualmente, la configuración y características de la instalación de pozos canadienses fue definida de acuerdo con los datos de la instalación real existente en el edificio LUCIA. Los valores de las magnitudes relevantes en este sentido se recogen en la Tabla 4.1 anteriormente presentada.

Finalmente, se asumió una operación ininterrumpida del sistema con un nivel de caudal fijo. Si bien, dentro del estudio paramétrico propuesto, se simularon tres casos con caudales de 500, 2500 y 5000 m³/h (representativos del rango de valores obtenido experimentalmente en el edificio – véase la sección 3.2. de esta memoria).

Finalmente, cabe resaltar las variables objetivo de este estudio. En concreto, en cada simulación se observó el tiempo de simulación requerido para completar los cálculos propuestos, así como el valor final de la temperatura de salida del aire de los pozos.

El primero es indicativo del coste computacional asociado a una u otra discretización del dominio de cálculo.

El segundo se puede tomar como variable comparativa para evaluar la desviación de los resultados de un caso a otro en función de la distinta discretización o mallado. En la Figura 4.5 se aprecia cómo la temperatura de salida de los pozos calculada evoluciona desde su valor inicial en función de la temperatura real del aire a la entrada en los casos B y D de la tabla 7 modificando el parámetro “Distancia a la frontera profunda del terreno (FF_DE)”. Durante un periodo relativamente amplio, las diferencias en esta evolución son mínimas para cualquier mallado propuesto, por lo que es necesario plantear una simulación relativamente larga que permita apreciar la influencia en los resultados. Con este fin, en el caso de estudio de referencia se ha considerado un periodo de ‘calentamiento’ del modelo (anterior al comienzo del mes de febrero). Teniendo esto en cuenta, es evidente que las diferencias en los ‘perfiles’ de temperatura obtenidos a lo



largo del tiempo, son proporcionales a las obtenidas para el valor de esta temperatura de salida en el último instante de tiempo de la simulación, lo que justifica la elección de ésta como variable objetivo.

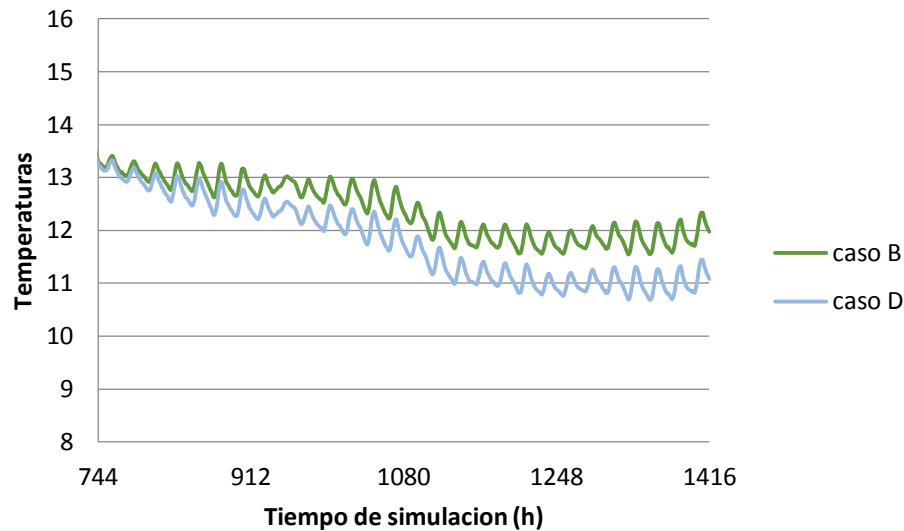


Figura 51. Evolución de la temperatura de salida de los pozos calculada desde su valor inicial en función de la temperatura real del aire a la entrada en los casos B y D

Finalmente, es indispensable establecer los valores de los parámetros del mallado que caracterizan cada una de las simulaciones del estudio. En este sentido, la Tabla 6 muestra los factores considerados y los niveles (valores) contemplados en cada uno de ellos. El análisis paramétrico de sensibilidad del modelo es el resultado de llevar a cabo las simulaciones con todas las combinaciones posibles.

Tabla 6. Planteamiento del estudio paramétrico de sensibilidad del modelo

Factor	Valores	Unidades
Distancia a la frontera laterales (FF_LR y FF_FB)	1, 10, 20	m
Distancia a la frontera profunda del terreno (FF_DE)	1, 10, 20	m
Tamaño del nodo más pequeño	0.1, 0.2	m
Multiplicador de nodo	2, 4	-
Caudal de aire	500, 2500, 5000	kg/h

La Tabla 7 presenta los resultados derivados de este estudio paramétrico, y a continuación se comentan las conclusiones más relevantes derivadas de ellos.

Tabla 7. Planteamiento de las distintas simulaciones

ID	Caudal	Tamaño De dominio	Multiplicador De Nodo	A		B		C		D		E		F	
				Tiempo de simulación (s)	T _a fin (°C)	Tiempo de simulación (s)	T _a fin (°C)	Tiempo de simulación (s)	T _a fin (°C)	Tiempo de simulación (s)	T _a fin (°C)	Tiempo de simulación (s)	T _a fin (°C)	Tiempo de simulación (s)	T _a fin (°C)
1	500	0,1	2	400,29	17,258	233,58	17,402	474,72	17,258	365,03	17,251	329,78	17,425	288,34	17,251
2	500	0,1	4	248,28	17,201	165,55	17,4	248,44	17,166	191,45	17,2	212,48	17,426	188,58	17,173
3	500	0,2	2	151,64	17,254	83,46	17,402	179,57	17,254	101,33	17,247	123,58	17,425	106,98	17,248
4	500	0,2	4	97,66	17,157	60,41	17,398	116,54	17,157	71,3	17,163	81,12	17,426	75,09	17,163
5	2500	0,1	2	406,15	13,006	235,61	13,839	477,94	13,006	283,99	13,157	330,15	13,738	294,11	13,157
6	2500	0,1	4	253,64	12,886	171,25	13,831	254,01	12,837	195,44	13,068	221,07	13,714	193,32	13,028
7	2500	0,2	2	155,48	12,996	85,42	13,835	185,01	12,996	103,81	13,148	126,58	13,733	110,8	13,149
8	2500	0,2	4	98,65	12,784	62,67	13,818	122,42	12,783	73,84	12,981	85,34	13,698	79,81	12,981
9	5000	0,1	2	400,57	10,292	233,82	11,318	469,58	10,292	277,92	10,508	326,7	11,169	291,65	10,508
10	5000	0,1	4	252,23	10,197	166,88	11,314	249,04	10,144	191,93	10,442	216,86	11,145	196,2	10,401
11	5000	0,2	2	155,13	10,286	83,78	11,316	183,05	10,286	101,52	10,503	125,52	11,166	109,6	10,503
12	5000	0,2	4	97,81	10,092	61,8	11,304	117,81	10,091	71,79	10,359	83,18	11,129	77,87	10,358
13	5000	0,05	2	1060,81	10,295	650,05	11,319	1228,48	10,295	759,87	10,511	904,88	11,17	808,49	10,511
14	5000	0,05	4	392,73	10,103	264,25	11,308	467,69	10,102	300,6	10,368	351,19	11,134	322,11	10,368



Caso de referencia

En primer lugar, conviene establecer un caso de referencia para poder interpretar y comparar los resultados derivados de las distintas simulaciones. En este sentido, el Estudio A (ver Tabla 7) se ha tomado como referencia. En él, el tamaño del dominio sólido está dado por los valores por defecto de las distancias a las fronteras laterales y a la frontera profunda, es decir: $FF_{LR} = FF_{FB} = FF_{DE} = 10$ m.

Como era esperable, el tiempo de simulación es menor cuanto más grueso sea el mallado (determinado por la combinación del tamaño del nodo más pequeño y del multiplicador de dicho tamaño).

Por otra parte, la siguiente observación de interés está relacionada con la variación de los resultados en función del caudal y del grosor del mallado dentro de este Estudio A de referencia. Obviamente, para distinto nivel de caudal la temperatura final alcanzada es distinta, pero lo que interesa analizar es cómo varía este resultado entre distintas mallas dentro de un mismo nivel de caudal. Cabe indicar que los resultados de temperatura varían como máximo en 0.3 C en función del grosor del mallado.

Tamaño del dominio

A continuación, cabe fijarse en las tendencias de los resultados obtenidos para el resto de estudios mostrados en la Tabla 7 (es decir, en aquellos casos en los que se modifica el tamaño del dominio de cálculo respecto al caso de referencia):

En primer lugar, es importante notar que para niveles de caudal de aire bajos las diferencias en los resultados no son muy importantes y podría estarse tentado de extraer conclusiones únicamente en base a la variación de los tiempos computacionales de cálculo. Sin embargo, al observar los resultados para el nivel de caudal más elevado (5000 m³/h) aparecen diferencias importantes de hasta 1.3 °C. Dado que en la instalación del edificio LUCIA se han medido caudales en torno a este último valor, la decisión de escoger un mallado más o menos fino también deberá estar asociado a la influencia sobre los resultados y no únicamente al tiempo de computación asociado.

Analizando los resultados del 'Estudio B' (en el que se han reducido las dimensiones del dominio hasta $FF = 1$), se observa una reducción muy importante del tiempo de cálculo pero una variación en los resultados nada despreciable. Por tanto, cabe pensar que asumir un mallado tan grueso supone una pérdida de precisión.

Sin embargo, el caso de referencia (establecido por defecto) no tiene por qué ser el óptimo, y cabe plantear qué ocurre cuando el dominio de cálculo se incrementa (haciendo $FF = 20$). Los resultados del 'Estudio C' muestran un



aumento del tiempo de cálculo en tal situación (aunque sensiblemente menor al esperado), pero apenas afecta a la temperatura final alcanzada. Por tanto, no interesa considerar en el modelo un dominio sólido tan grande ya que el incremento de tiempo no está justificado con una mejora de la precisión.

Los siguientes casos (del '*Estudio D*' en adelante) plantean dominios de cálculo resultantes de combinar distintos valores para la distancia a las fronteras laterales (FF_LR y FF_FB) y a la frontera profunda (FF_DE). Al reducir FF_LR y FF_FB, sin modificar el tamaño del dominio en profundidad, se obtienen reducciones del tiempo de cálculo entre un 20 - 30 %, y la temperatura alcanzada al final de la simulación no se ve modificada en exceso (se observan diferencias máximas en torno a 0,3°C), por lo que esta puede ser una opción interesante a la hora de definir el dominio de cálculo.

Por el contrario, en el '*Estudio E*' se puede apreciar de nuevo que al reducir el dominio de cálculo a base de reducir la distancia a la frontera profunda supone unas diferencias importantes en los resultados de temperatura que ya han sido comentadas.

Así, de las observaciones anteriores se deduce que la distancia a la frontera en profundidad (FF_DE) es la dimensión crítica del dominio. Su reducción implica una pérdida de precisión importante, si bien, manteniendo su valor en el de referencia es posible combinar dominios más pequeños en sus dimensiones longitudinal y transversal, de forma que se reduzca el coste de cálculo y no se pierda precisión.

Finalmente, y derivado de lo anterior, en el '*Estudio F*' se analizó si la consideración de un valor más grande de la dimensión en profundidad afectaba a los resultados. Sin embargo, no se obtienen diferencias apreciables ni en el tiempo de simulación ni en las temperaturas alcanzadas.

Grosor del mallado del dominio sólido

En cada uno de los '*Estudios*' presentados se observa que el grosor de la malla de cálculo influye sobre el tiempo de cálculo de la forma esperada. Cuanto mayor es el tamaño del nodo más pequeño y mayor es el tamaño de multiplicador (lo que causa un mallado menos fino), el tiempo de simulación se reduce notablemente. En particular, el caso más favorable en este sentido (tamaño de nodo más pequeño = 0.2 y multiplicador = 4) proporciona una reducción aproximada del tiempo de simulación en torno a un 75%.

Por otro lado, respecto a los resultados de temperatura obtenidos es posible afirmar que no se modifican de forma importante, existiendo diferencias máximas de 3 décimas de grado. Nuevamente, estas diferencias son mayores al trabajar con caudales más grandes.

Por tanto, parece asumible tomar el mallado más grueso de entre los estudiados, adoptando 0.2 y 4 como tamaño del nodo menor y multiplicador de nodo respectivamente. No obstante, una solución intermedia como es el caso 0.2 m y multiplicador 2, produce un menor error en los resultados de temperatura obtenidos sin perjudicar en exceso al tiempo de cálculo. Por ello, en base a un criterio personal se ha propuesto tomar esta opción como la más interesante de cara a la realización de posteriores simulaciones en este trabajo.

Por último, es posible preguntarse si un mallado aún más fino que el definido por defecto en TRNSYS podría afectar a los resultados numéricos obtenidos, sugiriendo su utilización a pesar del incremento de tiempo de cálculo asociado. Por ello, se han probado unos casos de estudio adicionales (casos 13 y 14) en los que se reduce el tamaño del nodo más pequeño hasta 0.05 m. Se observa que los resultados apenas varían y, por el contrario, como era previsible, los tiempos de simulación aumentan en exceso. Así pues, dicha opción queda descartada aquí.

De acuerdo con todo lo anterior, puede concluirse que el caso más favorable será el caso D de [1, 1, 1, 1, 10, 0.2, 2] señalado en la Tabla 7 adjunta para los diferentes caudales.

4.5. Comparación de resultados medidos y simulados

Una vez realizado el análisis de sensibilidad del mallado, se escogió el grupo de parámetros más adecuado (Estudio D) para la realización de simulaciones bajo condiciones de contorno reales (obtenidas de la monitorización experimental). Se realizaron cuatro simulaciones para meses de verano (julio y agosto de 2015) y para meses de invierno (enero y febrero de 2016) y se compararon los resultados de simulación con los resultados medidos. La siguiente figura muestra el modelo general definido en TRNSYS Studio:

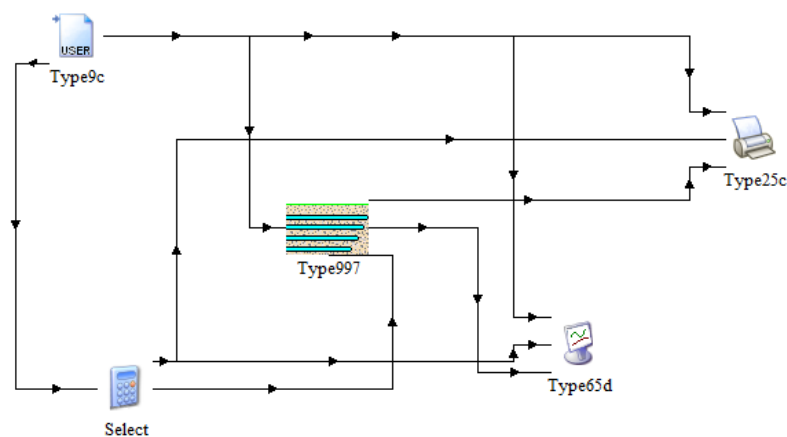


Figura 52. Modelo general en TRNSYS Studio definido para la comparación de resultados medidos y simulados

El módulo 'Type9c' lee los datos reales del edificio LUCIA a través de un archivo externo para cada caso.

La Figura 53 muestra los resultados obtenidos para julio de 2015.

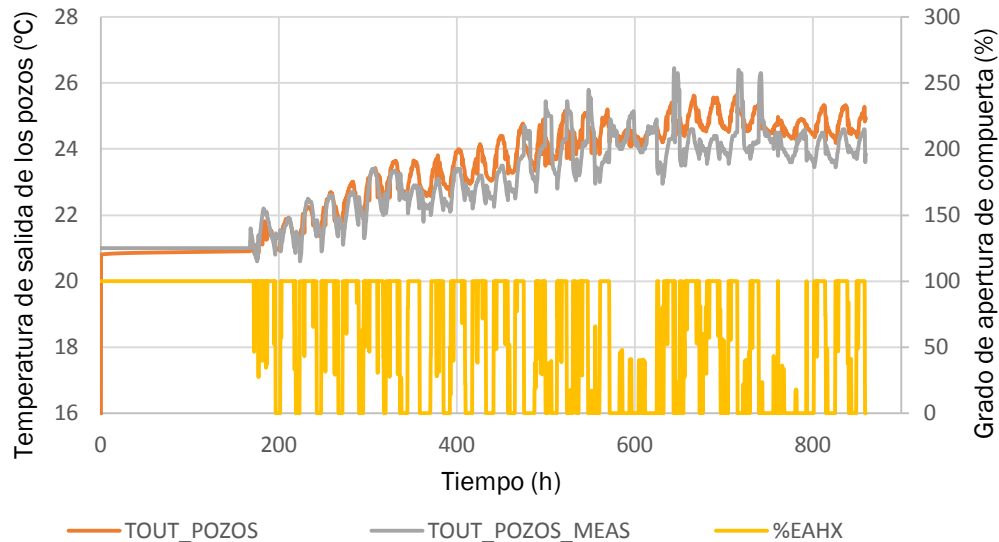


Figura 53. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Julio de 2015

En primer lugar, tanto para este como para el resto de casos analizados presentados en las páginas siguientes se debe apreciar que se ha considerado una etapa o periodo preliminar de 'calentamiento del modelo'. Su objetivo es comenzar la simulación con todas las variables del modelo en un valor lo más cercano posible a la realidad. Este aspecto es de especial relevancia aquí dado que al comienzo de la simulación la temperatura del subsuelo responde a una determinada condición inicial que no tiene en cuenta la 'historia térmica' real del mismo. Por tanto, lo que se hace ajustar los valores de temperatura exterior y caudal para forzar al modelo a comenzar la simulación en el nivel térmico más real posible en un tiempo razonable.

Por otro lado, en relación a este caso correspondiente al mes de julio, cabe comentar que se ha adaptado el caudal a 4000 m³/h, ya que tras varias pruebas con TRNSYS se observó un buen ajuste de los datos de las temperaturas de salida de los pozos. Se trata de un valor en el rango de los determinados con las medidas experimentales in situ realizadas en el edificio LUCIA, y pese a que no es el procedimiento ideal, dada la falta de datos disponibles de mayor precisión, esto permite observar un comportamiento general del modelo y extraer las siguientes conclusiones.

En todo caso, se observa que el modelo capta las tendencias en la temperatura de salida de forma bastante satisfactoria, con diferencias máximas en torno a 1 °C.



Además, esta coincidencia de tendencias es más clara en periodos en los que la compuerta de salida de aire de los pozos (representada en amarillo) está abierta al 100% (que es el caso sobre el que realmente influye la definición del modelo).

Cuando dicha compuerta está cerrada, los resultados son menos interesantes porque el sistema no está en operación en la realidad. En estos tramos se observan picos en las gráficas que no se corresponden entre los datos simulados y medidos. Aunque es difícil asegurarlo con certeza, dichas diferencias pueden deberse a la influencia de la temperatura exterior sobre la sonda de medida cuando no pasa caudal procedente de los pozos, aspecto este que no es capaz de recoger el modelo de simulación.

A continuación, la Figura 54 muestra los resultados obtenidos para julio de 2015.

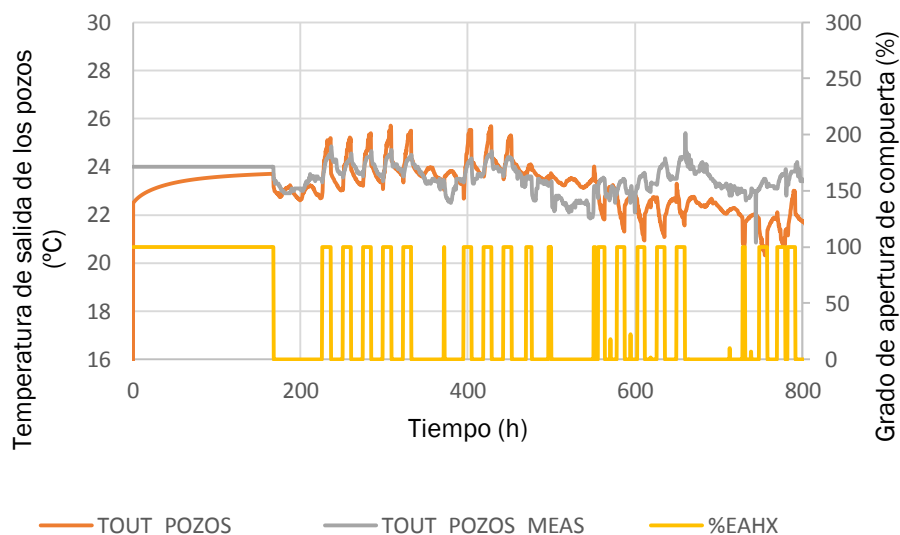


Figura 54. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Agosto de 2015

En el mes de agosto se fijó el caudal en un valor de 8000 m³/h, ya que al aumentar el caudal se observó una mejora en el ajuste de los resultados. Tal como se ha comentado anteriormente, dado que los datos recogidos en el edificio no son del todo rigurosos, no es posible establecer el valor del caudal con demasiada exactitud y es complicado saber con certeza a qué son debidas estas diferencias entre los caudales medidos in situ (en el rango de 4000-6000 m³/h) y los derivados del mejor ajuste de las simulaciones.

Los resultados correspondientes a los meses de invierno (Figura 55 y 56) permiten extraer conclusiones similares, siendo significativos los tramos donde la compuerta del aire de salida de los pozos está abierta por completo.

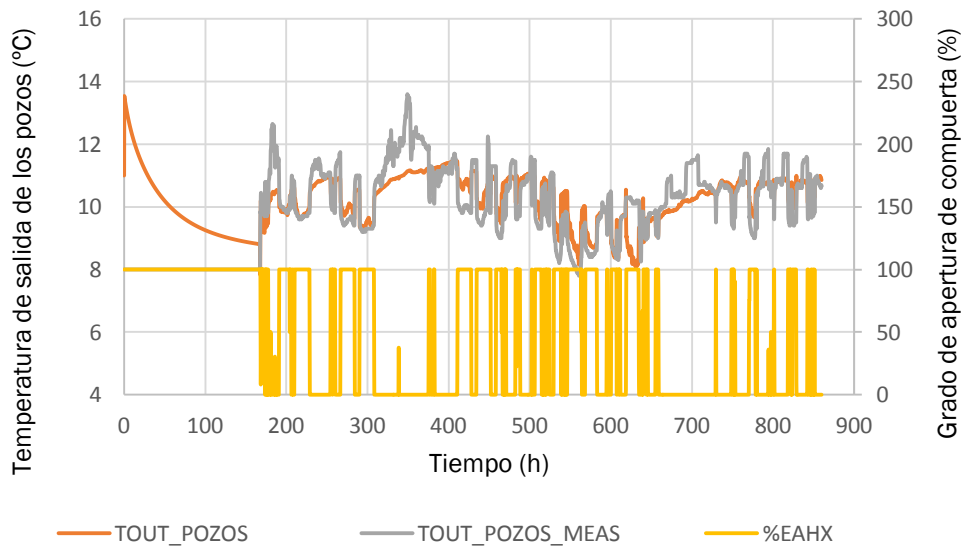


Figura 55. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Enero de 2016

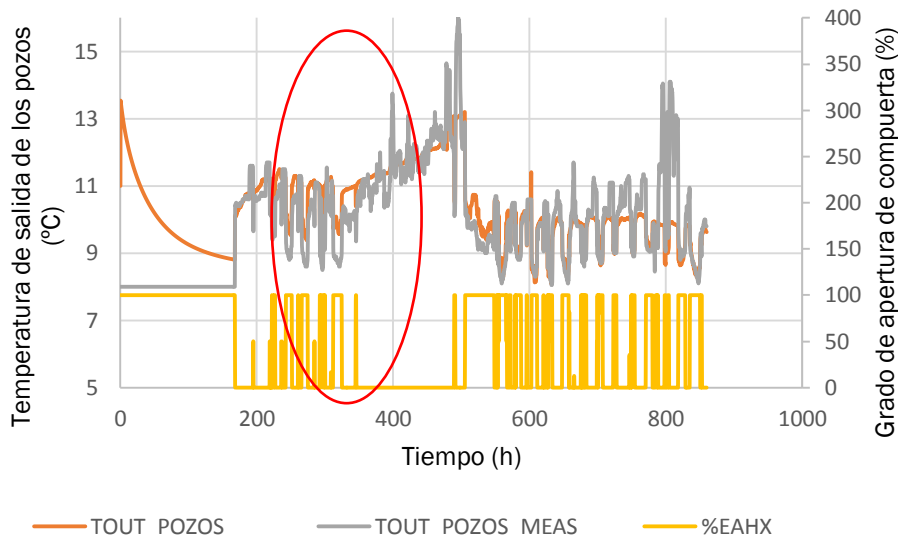


Figura 56. Comparación entre resultados medidos y simulados para el mes de Febrero de 2016

El mes de febrero (Figura 56) muestra un claro ejemplo de aspectos ya comentados, con un tramo de larga duración en el cual la compuerta EAHX permanece cerrada y en el que se aprecia cómo la temperatura simulada no es capaz de reproducir los picos mostrados en la temperatura real. Cabe insistir en la idea de que este hecho puede deberse a que el aire que se introduce por el conducto directamente del exterior puede influir en la sonda de temperatura del conducto por el que entra el aire de los pozos (cuando esta compuerta está cerrada).



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario





Capítulo 5. Simulación de un sistema EAHX en la climatología española



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario



5.1. Planteamiento del estudio de simulación

A partir de los resultados derivados de los análisis previos, tanto de la monitorización de la instalación de pozos canadienses del edificio LUCIA como de los trabajos preliminares realizados con el modelo de TRNSYS para este tipo de sistemas, en este capítulo se plantea el desarrollo de un estudio de simulación más global que permita obtener una primera estimación del potencial de ahorro del sistema EAHX en distintas climatologías de la geografía española.

Para ello, se define en TRNSYS una instalación de pozos idéntica al diseño existente en el edificio LUCIA, planteando un modelo general en TRNSYS Studio como el mostrado en la Figura 57. Se considera el 'Type99' para la lectura y tratamiento de datos climáticos, así como un módulo específico ('Type14h') para la definición de los horarios de operación diarios ('days') y semanales ('weeks').

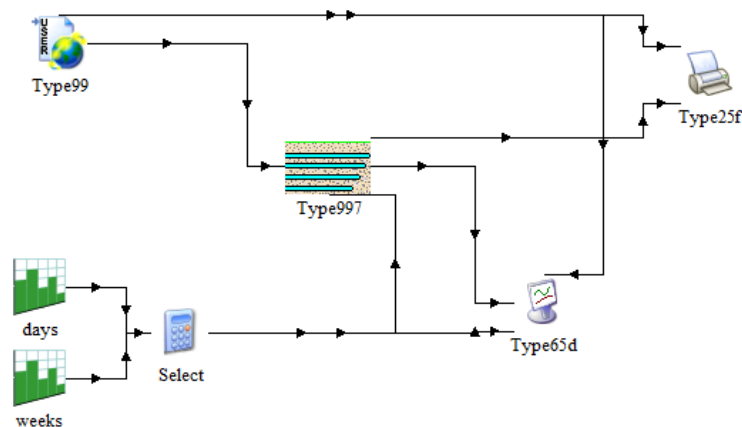


Figura 57. Vista general de los resultados derivados de las simulaciones en distintas zonas climáticas.

Objetivo del estudio de simulación

El objetivo principal de este estudio consiste en la estimación de los ahorros energéticos obtenibles en una instalación de ventilación en la que se prevea la utilización de un sistema de pozos canadienses o EAHX a lo largo de todo el año en distintas zonas climáticas españolas.

Dicha estimación se realizará en base a resultados de simulación derivados del modelo estudiado en este trabajo y con la consideración de un sistema que posea las mismas características de diseño que el planteado en el edificio LUCIA.

Cabe recordar que el sistema EAHX es un sistema integrado en la instalación de ventilación del edificio, que trata el aire exterior de aporte reduciendo o incluso eliminando la carga de ventilación. Esta carga de ventilación depende



del caudal de aire exterior aportado y la diferencia de temperaturas existente entre el ambiente exterior y el interior (considerado en condiciones de confort). Así pues, la carga de ventilación viene expresada según la ecuación siguiente:

Nótese que se ha utilizado el valor absoluto de la mencionada diferencia de temperaturas haciendo referencia al distinto sentido de la carga en invierno y en verano. Es obvio que, de forma general, en invierno la temperatura exterior será más baja que la interior, y la ventilación supondrá una parte de la carga de calefacción total del local, mientras que en verano la temperatura exterior será superior y la carga de ventilación supondrá una carga de refrigeración.

Por otro lado, el efecto buscado con el sistema EAHX se basa en el preacondicionamiento del aire exterior, reduciendo la diferencia de temperaturas a la que debe hacer frente la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA), es decir, reduciendo la carga de ventilación. Por lo tanto, la potencia calorífica asociada a ese preacondicionamiento, que en adelante llamaremos potencia 'recuperada', viene expresada por la ecuación siguiente:

En base a estas consideraciones será posible obtener una estimación del ahorro de energía anual en términos absolutos (kWh) sin más que tener en cuenta la potencia 'recuperada' a lo largo de todo el año. Igualmente, es razonable, expresar este ahorro en términos porcentuales respecto a la demanda de ventilación total que existiría si no se utilizasen los pozos. Precisamente serán estas las variables objetivo analizadas como resultado del presente estudio de simulación.

Características generales del estudio de simulación

A continuación, es necesario definir con algo más de detalle las principales hipótesis y consideraciones generales tenidas en cuenta en el planteamiento del estudio:

a. Zonas climáticas analizadas

En la geografía española se dan distintas condiciones climatológicas que el Código Técnico de la Edificación [9] clasifica en distintas zonas atendiendo a dos índices característicos de la severidad climática en invierno y en verano. Para la severidad climática de invierno se consideran 5 categorías (de la A a la E, de condiciones más suaves a más extremas), mientras que para la severidad climática de verano se consideran 4 categorías (de 1 a 4, de condiciones más suaves a más extremas). Dicha clasificación arroja 20 combinaciones posibles de las cuales solamente 12 se dan en nuestra geografía.

A continuación, la Figura 58 muestra un mapa nacional con una clasificación de las distintas provincias según sus correspondencias climáticas:



Figura 58. Mapa nacional de zonas climáticas

En el presente estudio solamente se han analizado 4 zonas climáticas de las 12 mostradas anteriormente. Estas son: zona climática B4, representativa de provincias como Huelva o Córdoba; zona climática C1, correspondiente a provincias como La Coruña o San Sebastián; zona climática C2, con ciudades como Barcelona; y por último, la zona climática D2, tratada en todos los estudios anteriores y correspondiente a la provincia de Valladolid.

b. Propiedades físicas del subsuelo

El terreno existente en cada zona climática posee, en general, distintas propiedades térmicas. Incluso dentro de una misma zona climática es evidente que estas propiedades pueden diferir de forma importante de unas ubicaciones concretas a otras en función de sus características geológicas. Por tanto, en este sentido se ha optado por tomar unas mismas propiedades del terreno para todas las simulaciones con el fin de obtener, al menos, unos resultados comparables entre zonas climáticas, que no se viesen afectados por un subsuelo más o menos favorable en cada caso.

El valor concreto de cada una de las propiedades de interés se recoge en la Tabla 8 [23].

Tabla 8. Propiedades físicas del subsuelo

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	2200	Kg/m ³
Calor específico	0.75	kJ/(kg·K)
Conductividad térmica	5	W/(m·K)



c. Características operacionales de la instalación

En las simulaciones realizadas se ha considerado que la instalación de ventilación analizada se encuentra en funcionamiento durante el horario de ocupación del edificio, consistiendo este, de forma genérica, en un horario de 08.00 h a 20.00 h durante todo el año en los días laborables (de lunes a viernes). Durante los fines de semana la ventilación está parada.

Asimismo, durante su funcionamiento se ha tenido en cuenta un control de la compuerta de la toma de aire de los pozos en base a la comparación de las condiciones de temperatura exteriores y las existentes a la salida de los pozos. Tal como ya se describió en capítulos anteriores, el sistema toma el aire exterior bien de los pozos o bien directamente del exterior en función de qué condiciones sean las más favorables para el acondicionamiento.

Por otro lado, dado que la decisión de qué condiciones son más favorables depende del periodo del año o del signo de la carga total del local en cada instante, se ha tomado como hipótesis que dicha carga total será de calefacción en invierno y de refrigeración en verano, definiendo la discriminación de estos periodos de la forma siguiente:

- Invierno: meses de enero a abril y de octubre a diciembre.
- Verano: meses de mayo a septiembre (ambos incluidos).

En este mismo sentido, a la hora de calcular la carga de ventilación en cada instante, se ha considerado una consigna interior de confort de 21 °C a lo largo de todo el invierno y de 24 °C a lo largo de todo el verano.

d. Comentarios adicionales

La simulación se ha realizado con un paso temporal de 1 hora cubriendo un periodo analizado total de 8760 horas desde las 00.00 h del 1 de enero hasta las 24.00 h del 31 de diciembre.

Por último, cabe señalar que en todas las simulaciones se ha tenido en cuenta un periodo adicional de un mes como periodo previo de 'calentamiento' del modelo. Tal como ya se comentó en capítulos anteriores, el objetivo de este procedimiento es aproximar las condiciones iniciales del modelo al comienzo del periodo de interés a aquellas existentes en la realidad que son fruto de la historia térmica del terreno y del sistema.

5.2. Resultados y discusión

Tras lo explicado en el capítulo anterior, se muestran los resultados mostrados por TRNSYS Studio en diferentes climatologías españolas.

La Figura 59 hace referencia a las simulaciones realizadas en todas ellas.

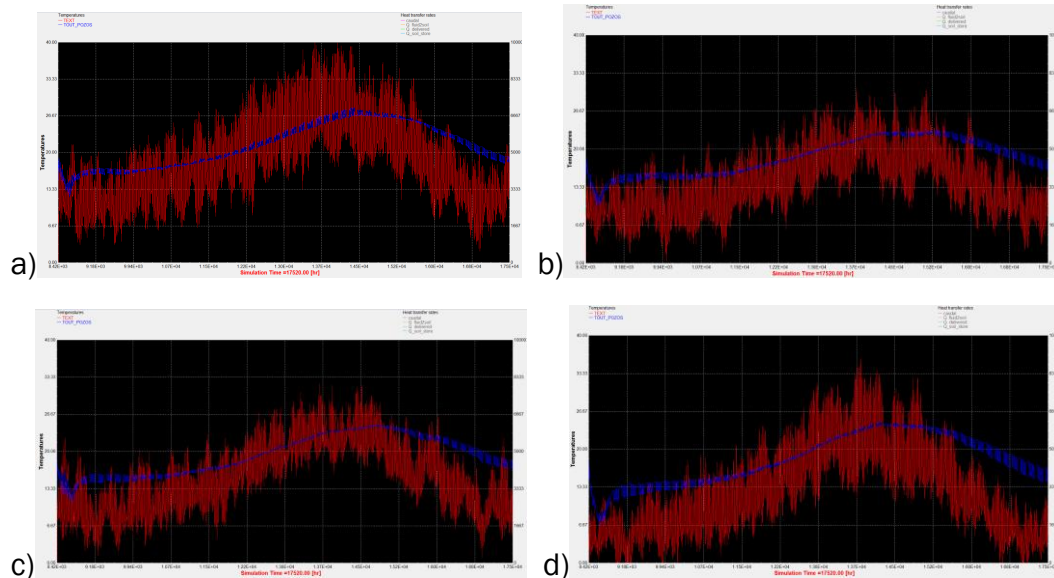


Figura 59. Vista general de los resultados derivados de las simulaciones en distintas zonas climáticas: a) B4, b) C1, c) C2 y d) D2

Asimismo, a continuación se muestra una vista ampliada de los resultados correspondientes a la zona climática B4:

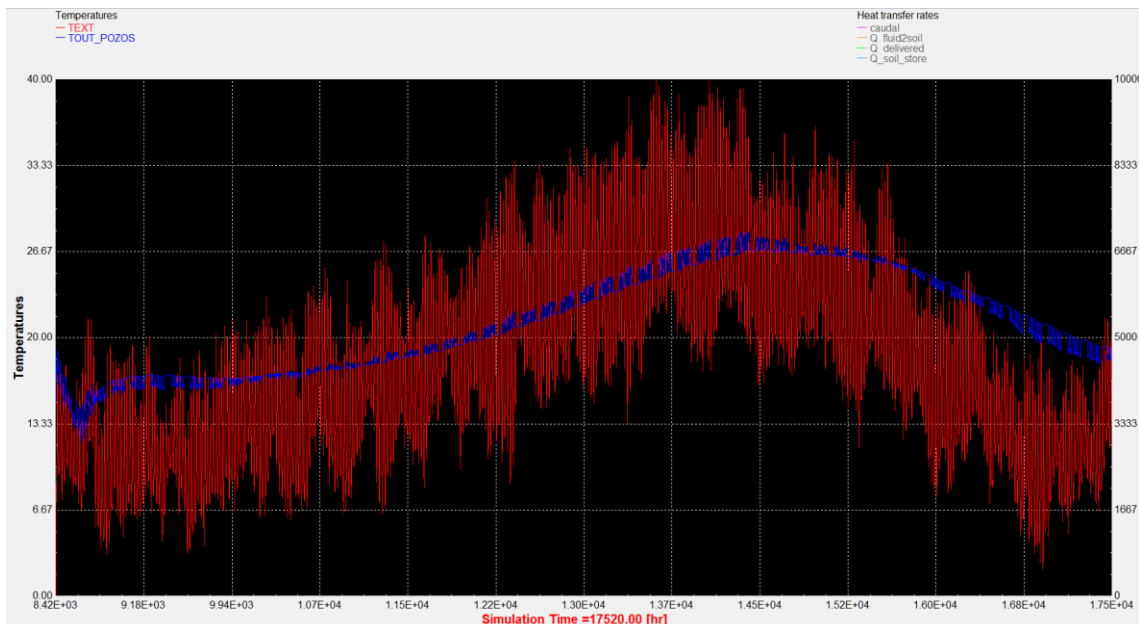


Figura 60. Vista ampliada de los resultados de simulación. Ejemplo: Zona B4



En cualquiera de las figuras anteriores se puede apreciar claramente el efecto del sistema de pozos canadienses amortiguando las oscilaciones de la temperatura exterior tanto en la escala diaria como en el largo plazo a lo largo de todo el año.

Se aprecia además que los resultados derivados de las zonas C1 y C2 son bastante similares con temperaturas moderadas tanto en verano como en invierno. Sin embargo, las zonas B4 y D2 incorporan características propias que los diferencian claramente de estos. Por un lado, la zona D2 presenta temperaturas algo más cálidas en verano y notablemente más frías en el invierno, algo que es característico de un clima interior en la mitad norte de España. Por su parte, en la zona B4 se mantiene un invierno suave, pero las temperaturas alcanzadas durante la época estival son claramente más altas a las del resto de casos estudiados. Es importante tener en consideración estos aspectos a la hora de interpretar los resultados finales obtenidos en términos de ahorro energético.

A continuación, la Tabla 9 recoge dichos resultados obtenidos a partir de las simulaciones.

Tabla 9. Resultados de ahorro energía térmica derivados de las simulaciones

Clima	Localización	Q_{vent} (kWh _t)	Q_{rec} (kWh _t)	% ahorro
B4	Huelva	21997	19277	87.6%
C1	A Coruña	20137	14784	73.4%
C2	Barcelona	20480	16175	79.0%
D2	Valladolid	32984	22455	68.1%

En primer lugar, conviene destacar que, de forma general, el sistema EAHX es capaz de proporcionar una reducción de la demanda de energía térmica anual del orden de entre el 70% y el 90% de la demanda de ventilación total dependiendo de la climatología. Incluso para el caso menos favorable, se trata de un resultado que convierte a los pozos canadienses en un sistema muy interesante, y que a falta de estudios más detallados, permite intuir una viabilidad económica de la inversión asociada.

A la vista de la Tabla 9, en términos absolutos, la potencia térmica del preacondicionamiento llevado a cabo por el sistema EAHX (Q_{rec}) es mayor en la zona D2 (Valladolid), posteriormente en la zona B4 (Huelva) y claramente más baja en las zonas de climas más suaves (C1 y C2). Esto es coherente atendiendo a la mayor variación entre las temperaturas máximas y mínimas existentes en las dos primeras zonas. Es en estos casos en los que el 'amortiguamiento térmico' producido por el sistema es más eficaz y tiene un mayor potencial de ahorro.

La Figura 61 muestra la carga de ventilación a lo largo del año con y sin la disposición del sistema EAHX, pudiendo analizar mejor sus efectos.

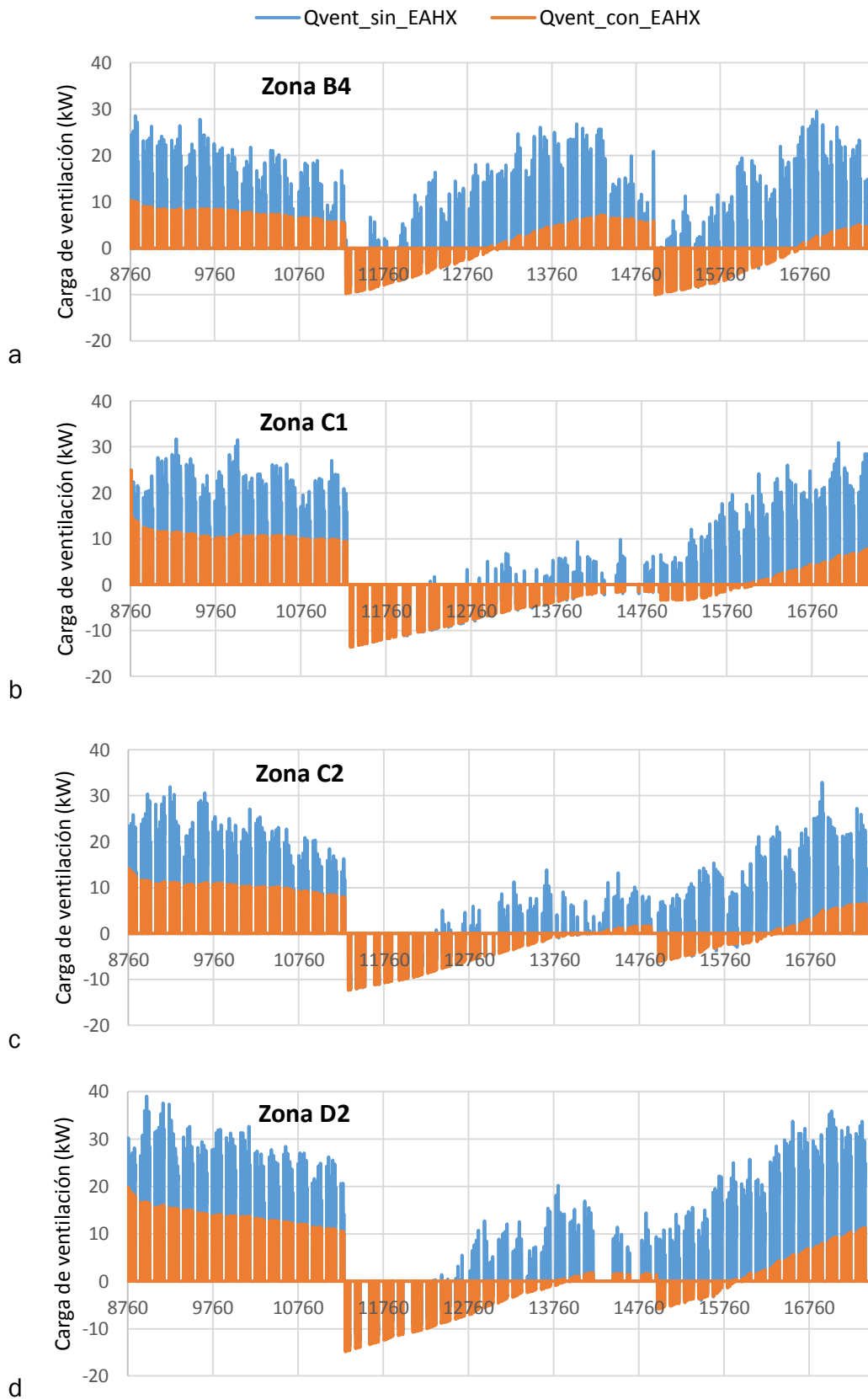


Figura 61. Carga de ventilación con y sin sistema EAHX para las 4 zonas climáticas: B4 (a), C1 (b), C2 (c) y D2 (d)



En esta Figura 61 se observa más claramente el aspecto comentado anteriormente: la zona B4 lleva asociada una carga de ventilación en verano sensiblemente más elevada que en el resto de zonas, mientras en la zona D2 se puede ver una carga de ventilación en invierno superior a la de otros climas.

Por otro lado, se debe comentar que los valores negativos de la carga de ventilación (bien en el caso sin el sistema EAHX o bien con él incorporado) hacen alusión a situaciones de invierno en las que el aire exterior está más caliente que la consigna de confort y reduciría la carga de calefacción total del local, o a situaciones de verano en las que el aire exterior es más fresco que la consigna de confort y la carga de refrigeración total se ve reducida. Estos periodos son mucho más escasos cuando el sistema EAHX no está considerado, sin embargo, al utilizar los pozos, se observa cómo en un importante número de horas el sistema no es sólo capaz de reducir la carga de ventilación existente, sino que además contribuye a combatir otras cargas (reduciendo las necesidades totales de los sistemas de calefacción o refrigeración del edificio).

Por último, se ha de mencionar que, sin haber profundizado en la definición del caso de estudio ni pretender aportar una validación detallada de los resultados de simulación mostrado, el ahorro absoluto en la demanda térmica proporcionado por el sistema EAHX en el caso de Valladolid (22455 kWh en este estudio) es consistente con valoraciones previas existentes. En particular, un estudio de simulación energética E-Quest realizado externamente en la etapa de diseño del edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid proporcionaba un valor comparable de 25000 kWh de energía aportada por pozos de iguales características.



Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario





6.1. Conclusiones

Aumentar los niveles de ventilación tanto por las exigencias de los usuarios, como por las nuevas normativas de calidad del aire, implican un aumento en el consumo de energía de los sistemas de ventilación. Sin embargo, es necesario reducir este consumo para minimizar los costes tanto económicos como medioambientales, asociados a su utilización.

En este sentido, el presente trabajo ha llevado a cabo distintos análisis de carácter tanto experimental como de simulación sobre la operación de un sistema de preacondicionamiento del aire de ventilación basado en unos pozos canadienses (intercambiador tierra-aire).

Las conclusiones más relevantes derivadas de dicho estudio son:

1. Se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo matemático implementado en el entorno de simulación TRNSYS en función de los parámetros del mallado del dominio del subsuelo considerado en él. A partir de este análisis se ha obtenido una combinación óptima de los parámetros que hacen que se tenga una precisión de los resultados y un tiempo de simulación asumibles.
2. A partir de esta selección de parámetros, se han comparado los resultados del modelo de TRNSYS con medidas experimentales realizadas in situ en un edificio universitario. En todo caso, se observa que el modelo capta las tendencias en la temperatura de salida de los pozos de forma bastante satisfactoria, con diferencias máximas en torno a 1 C.
3. No obstante, cuando la compuerta del conducto del sistema EAHX está cerrada se observan picos en las gráficas que no se corresponden entre los datos simulados y medidos. Este hecho puede ser susceptible de trabajos futuros.
4. Haciendo uso de este modelo, la simulación de un intercambiador tierra-aire en distintas zonas climáticas de la geografía española hace posible obtener conclusiones sobre cuáles son los lugares y qué condiciones deben darse para que estos sistemas puedan ser más eficientes y se obtenga un mayor aprovechamiento de su instalación.
5. Tras las simulaciones en TRNSYS de las cuatro zonas climáticas (B4, C1, C2 Y D2), de forma general, se ha observado que el sistema EAHX es capaz de proporcionar una reducción de la demanda de energía térmica anual del orden de entre el 70% y el 90% de la demanda de ventilación total, lo cual convierte a los pozos canadienses en un sistema muy interesante.



6. En términos absolutos, la potencia térmica del preacondicionamiento llevado a cabo por el sistema es mayor en la zona D2 (Valladolid), y posteriormente en la zona B4 (Huelva), lo cual es coherente atendiendo a la mayor variación entre las temperaturas máximas y mínimas existentes en las dos primeras zonas.

6.2. Trabajos futuros

Tal como ya se avanzó en el resumen de esta memoria, este trabajo constituye una iniciación a la investigación del ahorro energético de recuperadores de energía geotérmica en edificios universitarios.

En estos capítulos se han aportado unas herramientas y una base metodológica para la simulación energética de un intercambiador de calor en diferentes zonas climáticas españolas obteniendo sus correspondientes ahorros y recuperación de energía en instalaciones de climatización. Del mismo modo, se han alcanzado unos resultados que corroboran y detallan algunos aspectos del comportamiento y capacidades de ahorro de estos sistemas y que a su vez añaden una información cuantitativa de interés para los casos de estudio presentados.

Sin embargo, este trabajo puede ser ampliado de cara a la obtención de objetivos más ambiciosos. En este sentido, se pueden destacar los siguientes aspectos fundamentales hacia los cuales parece interesante orientar el trabajo futuro:

1. Ante la indefinición de unas propiedades térmicas del subsuelo determinadas, para el modelo de referencia utilizado en las simulaciones se tomaron los datos por defecto propuestos por TRNSYS. Luego es posible mejorar la recopilación de datos con mayor precisión de las propiedades térmicas del subsuelo determinadas para las diferentes zonas climáticas en las cuales se desee implementar un sistema EAHX como el estudiado en este trabajo.
2. Optimizar el procedimiento experimental para la toma de datos in situ del caudal de aire que circula por la instalación real del edificio LUCIA o de otros edificios que pudieran estar equipados con el mismo sistema.
3. Análisis más exhaustivo del comportamiento del modelo de simulación implementado en TRNSYS o en otros programas de simulación con el objetivo de mejorar los resultados derivados de ellos (en comparación con las medidas experimentales).
4. Del mismo modo, una modificación en los parámetros considerados en los estudios del sistema EAHX analizado (caudal volumétrico de aire, profundidad de montaje, material del tubo, valores característicos del subsuelo y clima en el emplazamiento de la instalación) permitiría



extraer conclusiones más amplias sobre el funcionamiento del mismo y su potencial de aprovechamiento.

5. Estudiar y elaborar un modelo o conjunto de modelos de edificios de referencia que doten a las simulaciones y a sus resultados de una óptima representatividad en lo relativo a sus características geométricas, constructivas y operacionales.
6. Profundizar en el estudio de las estrategias y sistemas de regulación y control de compuertas monitorizadas de cara a la obtención de conclusiones que permitan optimizar su aplicación maximizando el ahorro energético.



Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario





Referencias

1. REAL DECRETO 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. BOE núm. 207, 29 de agosto de 2007, 35931-35984
2. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx>
3. IEA. International Energy Agency. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.iea.org/>
4. OECD. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.oecd.org/>
5. M. K. Hubbert, 1956. *Nuclear energy and fossil fuels*. Publication No. 95 Shell Development Company. Exploration and production research division. Houston, Texas.
6. Blog HUELLA DE CARBONO. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.huellacarbono.es/>
7. ECOINTELIGENCIA. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.ecointeligencia.com/2011/03/la-apuesta-2020-para-2020/>
8. REGLAMENTO DELEGADO (UE) N°480/2014 DE LA COMISIÓN de 3 de Marzo de 2014. [sitio web]. 2016. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/pesca/temas/fondos-europeos/REGLAMENTO Complementario a DDCC 480 de 2014_tcm 7-329701.pdf
9. Código Técnico de la Edificación. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.codigotecnico.org/web/cte/>
10. Ministerio de industria, energía Y turismo. Secretaría de estado de Energía. Gobierno de España. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/ENERGIA/DESARROLLO/EFICIENCIAENERGETICA/CERTIFICACIONENERGETICA/Paginas/certificacion.aspx>
11. EDIFICIO LUCIA. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://edificio-lucia.blogspot.com.es/p/el-edificio.html>
12. BILBAO ARCHITECTURE. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.bilbaoarchitecture.com/portfolio-items/sede-de-idom/>
13. DN TANKS. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.dntanks.com/what-we-do/thermal-energy-storage/>



14. European Association for Storage of Energy, EASE. 2013. *Annex IV: Thermal Energy Storage*. In: *Technical Annex. Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030*. Disponible en: www.ease-storage.eu
15. Ana Tejero, 2012. Tesis doctoral. *Reducción del consumo energético y emisiones de anhídrido carbónico en edificios combinando enfriamiento evaporativo, enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid.
16. Blog Lonifasiko. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.lonifasiko.com/2016/04/06/castillo-predjama-eslovenia-historia-leyenda-erasmo-lueger/>
17. Agencia de turismo en Turquía. [sitio web]. 2016. Disponible en: <https://planturquia.com/2016/02/16/que-es-capadocia/>
18. J.P. Luna González. *Dirección general de Industria, Energía y Minas*. Septiembre de 2013. [sitio web]. 2016. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/18-09-2013-Jornada%20geotermia/1-Normativa-sobre-las-instalaciones-geotermicas>
19. Página oficial de ACCIONA. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.accionna.com/es/contacto/>
20. Plataforma de arquitectura. [sitio web]. 2016. Disponible en: <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-161723/oficinas-idom-de-madrid-acxt-arquitectos>
21. November 2006 Rev. 1, 12/07 (Spanish). Manual de Uso. Airflow Meter 922. FLUKE
22. Klein, S., Beckman, W., Mitchell, J. 2010. *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison (USA) <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
23. Estudio geotécnico construcción edificio de Nave Industrial en Mercaolid Valladolid. 2 de Diciembre de 2010.