



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Análisis de la Acumulación Térmica en la Estructura de un Edificio

Autor:

Alonso Perteguer, Javier

Primer Tutor:

**Patiño Molina, María del Rosario
Departamento de Química Orgánica**

Segundo Tutor:

**Andrés Chicote, Manuel
Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, Julio de 2016.



Resumen

Actualmente se está produciendo un desaprovechamiento de las características térmicas de los materiales de construcción. En regiones centroeuropeas, el uso de sistemas radiantes y su integración en la propia estructura del edificio (sistemas TABS) se está volviendo cada vez más frecuente de cara a invertir esta tendencia. Estos sistemas resultan de gran interés al proporcionar un acondicionamiento eficiente de los ambientes interiores a través de su integración dentro de la estrategia energética del propio edificio.

En este trabajo se analiza el comportamiento térmico de una losa de hormigón, así como de una mezcla de materiales similares que permitan más adelante desarrollar un dispositivo experimental flexible para el estudio de la operación de sistemas TABS. La construcción del correspondiente montaje experimental y la realización de ensayos básicos de transferencia de calor permiten caracterizar las alternativas propuestas y extraer conclusiones para la continuación de la investigación sobre sistemas TABS.

Palabras clave

- Eficiencia energética en la edificación
- Acumulación térmica
- Sistema de elementos estructurales activos
- Losa de hormigón
- Investigación experimental





Abstract

Nowadays, building designers hardly exploit the thermal characteristics of construction materials for building conditioning. In northern and central regions of Europe, where heating demand is dominant, the use of radiant systems integrated into the building structure itself (Thermally Activated Building Systems, TABS) is growing. Such systems exploits the thermal properties of structural materials in order to provide energy-efficient conditioning and involve them into the whole building energy strategy.

The high thermal inertia of these materials (such as concrete) enables the use of building mass as an energy storage, as well as they allow HVAC systems to run at temperature levels compatible with the exploitation of sustainable energy sources. One can consider cold water produced by a cooling tower at night, geothermal energy or excess heat coming from solar thermal systems.

This work presents the analysis of the thermal behavior of two different slabs made of concrete and of a mix of similar materials. This provides knowledge to develop in the future a flexible experimental setup for the study of TAB systems. The planning and construction of the corresponding experimental facility as well as the development of basic heat transfer experiments lead to the characterization of the proposed slabs and the obtention of relevant conclusions to continue the experimental research of TABS.

Keywords

- Energy efficiency in buildings
- Thermal storage
- Thermally Activated Building Systems (TABS)
- Concrete slab
- Experimental research





Índice de contenido

Introducción.....	15
Objetivos	16
Antecedentes.....	16
Capítulo I Situación Energética Actual	
I.1. Introducción.....	21
I.1.1. Aprovechamiento de energía primaria en la actualidad y en el futuro	23
I.1.2. Evolución del precio de la energía	26
I.1.3. Perspectivas de futuro de los tipos de energía.....	29
I.1.4 Impacto ambiental	33
I.2. Problemática energética en la edificación.....	37
I.2.1. Consumo Energético en la Edificación y su Equipamiento	39
I.2.2. Balance del Sector Edificios.....	43
I.2.3. Balance Periodo 2011-2020	46
I.3. Medidas en el sector Edificación y Equipamiento	49
I.3.1. Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes.....	50
I.4. Conclusiones	55
I.5. Referencias.....	56
Capítulo II Estado del Arte de las Tecnologías	
II.1. Principios generales del acondicionamiento radiante.....	61
II.1.1. Historia y antecedentes de los sistemas radiantes actuales.....	62
II.1.2. Fundamentos de transferencia de calor en sistemas radiantes	65
II.1.3. Confort térmico y sistemas radiantes	70
II.1.4. Ventajas e inconvenientes	71
II.2. Sistemas radiantes. Tipologías.....	73
II.2.1. Sistemas de paneles radiantes.....	77
II.2.2. Sistemas superficiales embebidos	81
II.2.3. Elementos estructurales activados TABS	83
II.3. Integración con alternativas de bajo consumo.....	91



II.3.1. Producción de agua fría en torres de enfriamiento	93
II.3.2. Producción de agua caliente en captadores solares	94
II.4. Referencias.....	95

Capítulo III Dispositivo Experimental y Trabajos Previos

III.1. Dispositivo experimental	101
III.1.1. Dispositivo con Hormigón	105
III.1.2. Dispositivo con mezcla de áridos	107
III.2. Equipos de medida.....	109
III.2.1. Sondas de Temperatura	110
III.2.2. Sistema de Adquisición de Datos de las Sondas.....	113
III.2.3. Horno de Calibración de Temperatura.....	115
III.2.4. Termoflujómetro	116
III.2.5. Sistema de Adquisición de Datos del Termoflujómetro.....	117
III.2.6. Multímetro	118
III.3. Trabajos previos de caracterización de materiales.....	119
III.3.1. Densidad del cemento.....	119
III.3.2. Densidad de la grava	120
III.3.3. Densidad de la arena	121
III.3.4. Densidad del hormigón húmedo.....	122
III.3.5. Densidad del hormigón seco	122
III.3.6. Densidad de mezcla de áridos.....	123
III.4. Referencias.....	124

Capítulo IV Planteamiento del Estudio y Análisis de Resultados

IV.1. Introducción.....	127
IV.2. Cálculo de la conductividad térmica K del hormigón	128
IV.3. Comprobación del flujo de calor a través de la losa de hormigón de 150mm	133
IV.3.1. Calentamiento 1h y enfriamiento hasta estabilizar	136
IV.3.2. Calentamiento 2h y enfriamiento hasta estabilizar	138
IV.3.3. Calentamiento 4h y enfriamiento hasta estabilizar	140
IV.3.4. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario.....	142
IV.3.5. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario.....	144
IV.4. Cálculo de la difusividad térmica del hormigón.....	146



IV.5. Cálculo de la conductividad térmica K de los áridos	147
IV.6. Comprobación del flujo de calor a través de la losa de áridos de 100mm	151
IV.6.1 Calentamiento 1h y enfriamiento hasta estabilizar	152
IV.6.2. Calentamiento 2h y enfriamiento hasta estabilizar.....	154
IV.6.3. Calentamiento 3 h y enfriamiento hasta estabilizar	156
IV.6.4. Calentamiento 4 h y enfriamiento hasta estabilizar.....	158
IV.6.5. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario	160
IV.6.6. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario	163
IV.7. Cálculo de la Difusividad térmica de los áridos	166
IV.8. Análisis de resultados	167
IV.9. Referencias	170

Capítulo V Conclusiones y Trabajos Futuros

V.1. Conclusiones	173
V.2. Trabajos Futuros	174

Anexo Calibración Sondas de Temperatura

A.1. Introducción a la calibración de las sondas de temperatura.....	177
A.2. Sondas 1-5	178
A.3. Sondas 6-10	181
A.4. Sondas 11-13	184
A.5. Sondas 14-17	186





Introducción, Objetivos y Antecedentes

Índice de contenido

Introducción.....	15
Objetivos	16
Antecedentes	16





Introducción

En la actualidad existe una evidente concienciación acerca de la obtención de sistemas y procesos energéticamente eficientes que permitan hacer un uso más sostenible y racional de los recursos del planeta. Las actuaciones encaminadas a alcanzar este objetivo son numerosas y abarcan todos los sectores de la actividad humana, en particular también al sector de la edificación.

Dada la estrecha relación entre el ser humano y los ambientes interiores en los que cada vez pasa una mayor parte de su tiempo, la preocupación por la eficiencia energética en los edificios ha de ir de la mano con la necesidad de garantizar una calidad de dichos ambientes en términos de confort visual, acústico, térmico y de calidad del aire. Ambos objetivos dependen en gran medida de la elección, diseño y operación de los sistemas de acondicionamiento, que a su vez son uno de los principales consumidores de energía en este ámbito.

En las últimas décadas los esfuerzos por desarrollar sistemas de acondicionamiento eficientes vienen siendo muy importantes y han dado lugar a la aparición y consideración de numerosas alternativas frente a los sistemas convencionales de uso más habitual. Entre ellos, cabe destacar el impulso que han recibido los sistemas radiantes basados en la cesión o disipación de calor desde amplias superficies en contacto con el ambiente interior cuya temperatura es controlada mediante la circulación de un fluido por un circuito hidráulico colocado en un plano más o menos superficial.

Los sistemas radiantes involucran diversas ventajas tanto en la utilización de la energía como en la provisión de adecuados niveles de confort térmico. Son capaces de trabajar a niveles térmicos moderados próximos a los del ambiente que favorecen la eficiencia de los sistemas de generación y plantean la posibilidad de aprovechar de fuentes de energía sostenibles de baja calidad que de otro modo serían descartadas.

Entre estos sistemas, los forjados activos o Thermally Activated Building Systems (TABS) son de especial consideración. Estos integran el circuito hidráulico en la propia estructura del edificio, activándola térmicamente y utilizándola como almacén energético. De esta forma, este concepto explota su particular comportamiento dinámico de alta inercia para potenciar las ventajas de las tecnologías radiantes y proporcionar un acondicionamiento térmico eficiente del ambiente interior. Si bien, estas características inerciales suponen al mismo tiempo el reto fundamental de cara a optimizar el aprovechamiento del sistema: su controlabilidad.



Este contexto evidencia el interés de profundizar en el estudio de los sistemas TABS y contribuir a su desarrollo y optimización, lo cual, precisamente, ha sido abordado en este trabajo.

Objetivos

El objetivo fundamental de las tareas llevadas a cabo en el presente Trabajo Fin de Grado, de acuerdo con su título, se centra en el análisis y estudio detallado del comportamiento térmico transitorio en elementos estructurales de hormigón. De esta forma se pretende contribuir al entendimiento de los sistemas de forjados activos (TABS).

La concreción de este objetivo principal se llevará a cabo a través del planteamiento y desarrollo de un dispositivo experimental completo que posibilite el estudio en el laboratorio de distintos procesos de acumulación/desacumulación de calor en una losa de hormigón. Asimismo, se extenderá dicho dispositivo para el análisis de una configuración semejante rellena de arena y grava que haga posible estudios paramétricos futuros de una forma flexible (pudiendo variar espesores, profundidades de la capa activa, etc. sin necesidad de construir y manejar múltiples losas)

A partir de los resultados obtenidos en estos experimentos, se extraerán las conclusiones pertinentes y se discutirán las aportaciones realizadas.

Antecedentes

Las tareas desarrolladas en este Trabajo Fin de Grado (TFG) siguen una línea continuista con los estudios desarrollados desde hace años en el Grupo de Investigación Reconocido (G.I.R.) de Termotecnia de la Universidad de Valladolid. A continuación se detallan los más relevantes:

- *Análisis energético y de confort térmico de estrategias sostenibles de acondicionamiento térmico de edificios basadas en sistemas radiantes.* Tesis doctoral. Autor: Manuel Andrés Chicote. Aborda distintos estudios tanto experimentales como teóricos y de simulación sobre sistemas radiantes, prestando especial atención a los TABS y a su potencial aplicación en modo refrigeración en climatologías del sur de Europa.
- *Análisis experimental de un sistema de disipación radiante por techo caliente.* Proyecto Final de Carrera. Autora: Elisa Barrero de Uña. Aborda el



análisis experimental del comportamiento de un sistema radiante de techo caliente ubicado en una sala climática de laboratorio y ensayado bajo un amplio rango de condiciones de operación en términos de temperatura de impulsión de agua y temperatura del ambiente interior. Los resultados obtenidos aportan información sobre la disipación de calor desde una superficie radiante del mismo modo que puede ocurrir en un sistema TABS.

- *Tecnologías eficientes e inteligentes orientadas a la salud y al confort en ambientes interiores.* Proyecto CENIT-TECNOCAI, liderado por ACCIONA y financiado por el Gobierno de España. Se trata de un gran proyecto de investigación multidisciplinar dirigido al estudio de tecnologías eficientes muy diversas capaces de proporcionar una mejora de la calidad de los ambientes interiores. En particular, el G.I.R. de Termotecnia de Universidad de Valladolid colaboró en este proyecto con la empresa IDOM en la monitorización y estudio de un edificio real equipado con TABS ubicado en Madrid, así como en el desarrollo de diversos análisis tanto experimentales como de simulación, relacionados con este tipo de sistemas.
- *Optimización del diseño de operación integrada de sistemas radiantes activados térmicamente con fuentes de baja energía en clima mediterráneo.* Proyecto OPTABSLOW financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del 'Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad'. Se trata de un proyecto de investigación de 3 años de duración actualmente en marcha y que aborda una ampliación de los trabajos anteriormente citados en relación con el conocimiento y entendimiento de la tecnología TABS. Dentro de él se proponen estudios experimentales detallados del comportamiento térmico de losas de hormigón activadas térmicamente, así como el planteamiento y evaluación de opciones de integración de TABS y fuentes de energía sostenibles en climatologías europeas con predominio de las necesidades de refrigeración (climatología mediterránea)

Finalmente, cabe destacar otros muchos trabajos realizados por alumnos de grado, postgrado y doctorado que se vienen desarrollando durante más de 20 años en el G.I.R. de Termotecnia en el ámbito de la eficiencia energética en la edificación.





Capítulo I

Situación Energética Actual

Índice de contenido

I.1. Introducción	21
I.1.1. Aprovechamiento de energía primaria en la actualidad y en el futuro	23
I.1.2. Evolución del precio de la energía	26
I.1.3. Perspectivas de futuro de los tipos de energía.....	29
I.1.4 Impacto ambiental	33
I.2. Problemática energética en la edificación	37
I.2.1. Consumo Energético en la Edificación y su Equipamiento	39
I.2.2. Balance del Sector Edificios	43
I.2.3. Balance Periodo 2011-2020	46
I.3. Medidas en el sector Edificación y Equipamiento	49
I.3.1. Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes.	50
I.4. Conclusiones	55
I.5. Referencias.....	56



Índice de Figuras

Figura I.1: Ciclo de vida de un recurso no renovable [1, Calero et al, 2012]	22
Figura I.2: Consumo energético mundial desde 1971 hasta 2014 [3, BP, 2015]	23
Figura I.3: Consumo per cápita mundial en toneladas de petróleo [3, BP, 2015]	24
Figura I.4: Consumo energético en España desde 1965 hasta 2012 [3, BP, 2015]	25
Figura I.5: Precios spot del crudo en dólares americanos / barril [5, IEA, 2015]	26
Figura I.6: Precios spot de productos procedentes del crudo en dólares americanos / barril [5, IEA, 2015].....	27
Figura I.7: Precios del carbón térmico en dólares americanos / tonelada [5, IEA, 2015] .	27
Figura I.8: Precios de importación del gas natural en dólares americanos / MBtu [5, IEA, 2015]	28
Figura I.9: Evolución del consumo de electricidad según tipo en MToe desde 1971 a 2013 [5, IEA, 2015]	28
Figura I.10: Emisiones mundiales de CO ₂ por combustible en Mt de CO ₂ [4, IEA, 2015]	33
Figura I.11: Emisiones mundiales de CO ₂ por región en Mt de CO ₂ [4, IEA, 2015]	33
Figura I.12: Temperatura media global en Fahrenheit durante el último siglo, Concentración media de CO ₂ en la atmósfera en partes por millón [10, NOAA, 2009] ...	34
Figura I.13: Evolución de gases de efecto invernadero en España 1990-2013 [7, MAAMA, 2016]	35
Figura I.14: Previsión del consumo de energía por sector [9, Minetur, 2012]	37
Figura I.15: Evolución de consumos del sector Edificios en el período 2007-2010 [11, MITYC, 2011]	39
Figura I.16: Evolución de consumo del sector Edificios doméstico en el período 2007-2010 [11, MITYC, 2011]	40
Figura I.17: Evolución de consumo del sector Edificios servicios en el período 2007-2010 [11, MITYC, 2011]	40
Figural.18: Distribución del consumo en el sector Edificios Doméstico 2010 [11, MITYC, 2011]	41
Figural.19: Distribución del consumo en el sector Edificios Servicios 2010 [11, MITYC, 2011]	41
Figura I.20: Consumo en el sector servicios entre 1990 y 2009 [11, MITYC, 2011]	42
Figura I.21: Previsión de evolución de la población considerada hasta 2020 [11, MITYC, 2011]	46
Figura I.22: Previsión de la evolución de los hogares considerada [11, MITYC, 2011]	46
Figura I.23: Previsión de la evolución de la clase energética en los edificios [11, MITYC, 2011]	47



I.1. Introducción

Durante los últimos años el ser humano se ha ido haciendo cada vez más dependiente de la energía hasta llegar a hoy, dónde esta se ha convertido en un bien vital. Las situaciones actuales de desarrollo y de nivel de vida se han alcanzado gracias al buen uso de la energía, pero debido al crecimiento de la población, al desarrollo económico e industrial y al aumento de riqueza per cápita en los países más desarrollados, el consumo de la misma se ha disparado en los últimos tiempos por lo que asegurar su disponibilidad se ha convertido en una de las principales preocupaciones de esta sociedad.

Este aumento exponencial en la demanda y consumo de la energía plantea dos grandes problemas como son, en primer lugar, el agotamiento de los recursos y, en segundo lugar, las consecuencias en el medio ambiente que puedan tener a corto, medio y largo plazo.

El agotamiento de los recursos lleva ligado un aumento de las importaciones de energía por parte del país, y por lo tanto lleva una gran dependencia de los precios asociados. La situación económica, política y social de un determinado país depende de esta forma de la situación energética.

La preocupación social por la destrucción del medio ambiente ligada al consumo de determinadas fuentes de energía no renovables como los combustibles fósiles ha aumentado y por consiguiente se están produciendo grandes cambios en los hábitos de consumo de energía.

Debido a todas estas preocupaciones se está trabajando con el objetivo de conseguir aumentar la eficiencia en materia de energía y adoptar nuevas políticas de actuación con objeto de asegurar la disponibilidad de esta energía para generaciones futuras, disminuir el impacto ambiental y conseguir un acceso universal a la energía [1, Calero et al, 2012].

Antes de comenzar a analizar la situación energética es recomendable definir la diferencia entre recursos y reservas:

Recurso se dice de las cantidades conocidas de una fuente energética.

Reserva se dice de aquellas cantidades conocidas de una fuente energética que son técnica y económicamente rentables en cada instante (ya sea en ese momento en un futuro). Estas pueden clasificarse en comprobadas y no comprobadas. De las primeras existe información acerca de su cantidad y

existencia, mientras que de las segundas se conoce información relativa a su situación geográfica.

Por tanto un recurso puede pasar a ser reserva si mejora la técnica de extracción o aumentan los precios de venta.

El paso de un recurso a reserva tiene sus límites, no sólo en términos económicos (la extracción de la última parte de una reserva no suele ser rentable), sino mucho más en términos técnicos (en caso de que la energía que haya que invertirse para la obtención y explotación del recurso sea superior a la energía almacenada en el propio recurso) [1, Calero et al, 2012].

Este es el “ciclo de vida” de un recurso no renovable, en el cual su propia explotación conduce a su desaparición (Figura I.1).

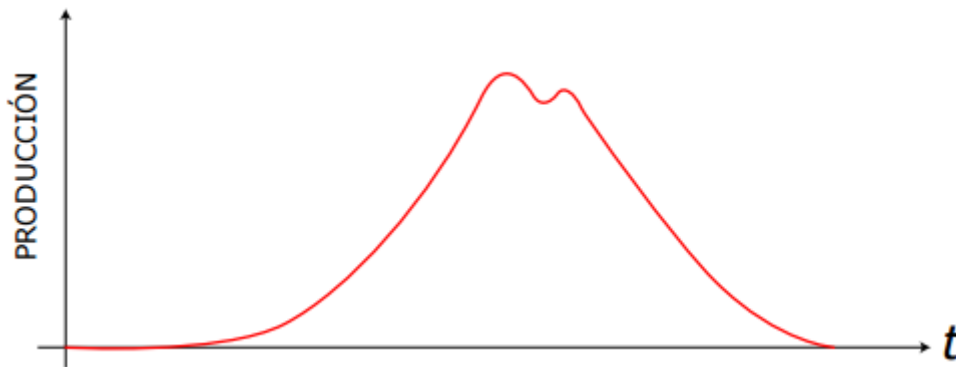


Figura I.1: Ciclo de vida de un recurso no renovable [1, Calero et al, 2012]



I.1.1. Aprovechamiento de energía primaria en la actualidad y en el futuro

Durante los últimos 40 años, el aprovisionamiento de energía primaria ha tenido una tendencia clara a aumentar debido al incremento de la demanda energética, por tanto ha sido necesaria la búsqueda de recursos que satisfagan dicha demanda y de grandes avances tecnológicos que permiten un mayor aprovechamiento de recursos [12, Narros F.J., 2014].

En la vista del siguiente gráfico (Figura I.2) se observa claramente una tendencia al aumento de energías en las décadas de los 80 y los 90, sobretodo en la energía nuclear aunque haya sufrido un estancamiento debido a la imagen social que este tipo de energía implica. Por otro lado hay que tener en cuenta que el uranio es un combustible limitado y que por tanto sus reservas se acabarían rápidamente en caso de una explotación masiva.

A la vista se ve que en 2008-2009 hubo un valle en las provisiones de energía mundial debido al inicio de la crisis económica que asoló a los países más desarrollados, principales importadores de energía.

Para hacernos una idea del panorama futuro, se podría firmar que el mapa energético está cambiando progresivamente, lo cual, conlleva consecuencias en el comercio energético. Debido al resurgimiento de la producción de gas y petróleo por parte de Estados Unidos el panorama se está redibujando y va a seguir así si se continúa con la eliminación de la energía nuclear y la propagación en la producción de gas no convencional.

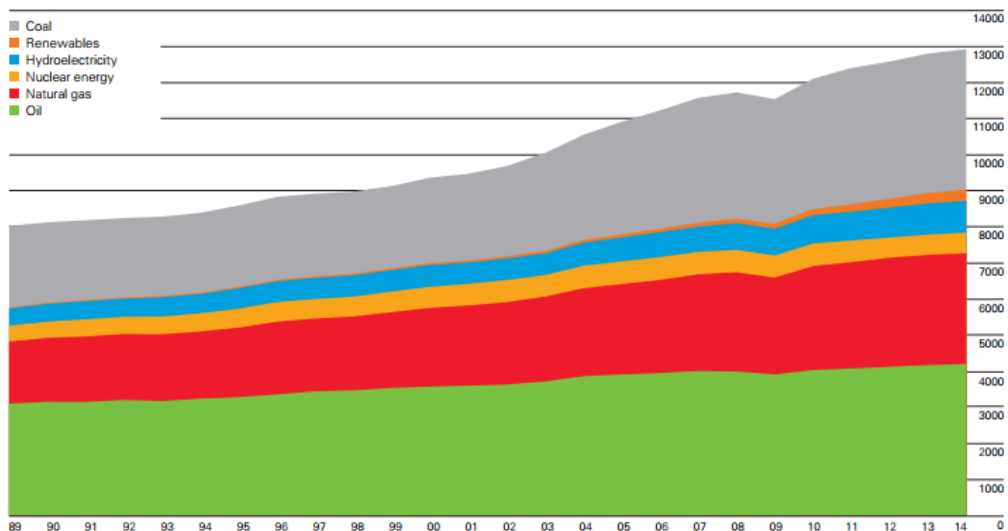


Figura I.2: Consumo energético mundial desde 1971 hasta 2014 [3, BP, 2015]

En cuanto al consumo mundial de petróleo (Figura I.3), países como Norteamérica, Rusia, Arabia Saudí, India y Japón ocupan las primeras posiciones. Este consumo está alcanzando cifras record en los últimos años, con un crecimiento aproximado del 1.3%.

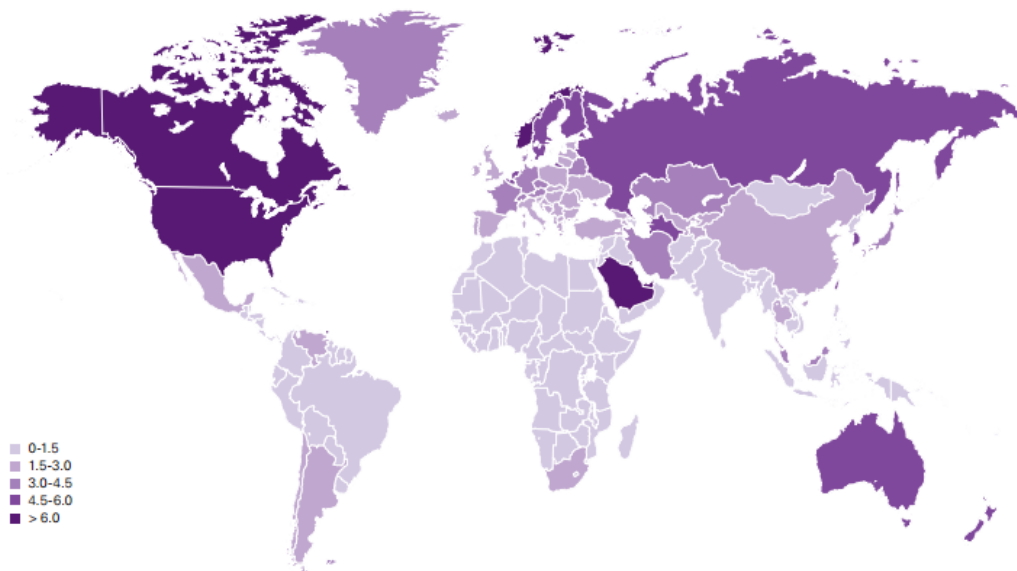


Figura I.3: Consumo per cápita mundial en toneladas de petróleo [3, BP, 2015]

En el panorama español, la evolución del consumo de energía desde 1990 hasta 2012 ha tenido variantes (Figura I.4). Obviamente el consumo ha tenido una tendencia a la alza de forma más o menos progresiva aunque no constante hasta el año 2007.

En los últimos años, debido a la fuerte crisis económica que asoló al país, el consumo de energía generalizado ha descendido notablemente, en el caso del petróleo incluso hasta situarse en niveles de los años noventa. La predicción es que siga descendiendo aunque no de forma tan pronunciada en los próximos años

En referencia al gas natural, este ha crecido notablemente a lo largo de los últimos años, en cambio en cuanto al carbón y sus derivados, su utilización cada vez es menor [12, Narros F.J., 2014].

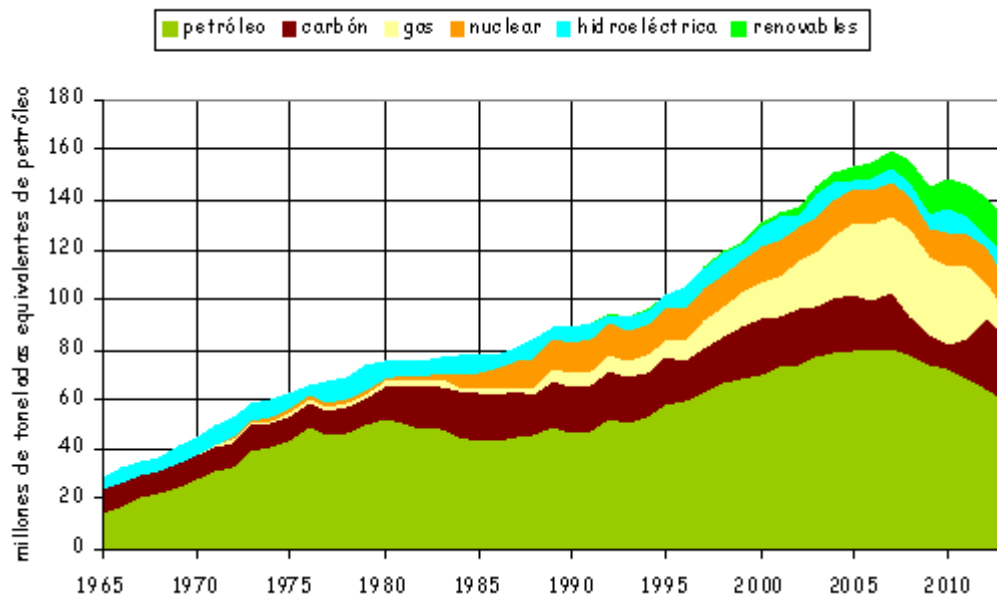


Figura I.4: Consumo energético en España desde 1965 hasta 2012 [3, BP, 2015]

Hay que resaltar que el consumo de energías renovables (Tabla I.1) ha aumentado a pesar de la crisis económica y que esto eleva a España a uno de los países con un mayor consumo de este tipo de energías [2, IDAE, 2013].

Tabla I.1: Consumo energético en España desde 2000 hasta 2013 [2, IDAE, 2013]

Fuentes ktep	2000	2004	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Carbón	20.936	19.168	21.598	20.129	21.049	20.513	17.908	20.037	13.504
Productos Petrolíferos	64.990	67.143	67.303	69.122	70.960	71.430	71.189	71.739	68.834
Gas	15.216	16.397	18.748	21.349	25.167	29.838	31.227	31.778	34.903
Nuclear	16.211	16.603	16.422	16.125	16.576	14.995	15.669	14.360	15.369
Energías Renovables	6.815	8.157	6.894	9.196	8.815	8.397	9.164	10.007	10.552
TOTAL	124.551	127.764	131.423	136.029	142.307	145.058	144.875	147.426	142.213

I.1.2. Evolución del precio de la energía

Para reflejar con la mayor fidelidad la evolución de los precios de la energía se ha optado por representar dicha evolución para las energías más explotadas actualmente que son el petróleo, el carbón y el gas natural, los cuales abarcan más del 65% de la energía total utilizada.

En los siguientes gráficos se puede apreciar la evolución en el precio del petróleo (Figura I.5 y Figura I.6), del carbón (Figura I.7) y del gas natural (Figura I.8) desde principios de los noventa hasta años actuales. En cuanto al petróleo, el precio se mantiene estable a lo largo de los años noventa, incrementándose a partir del año 2000 hasta la crisis de 2008 donde se produce un decremento muy pronunciado en muy poco tiempo. Posteriormente el precio ha llegado a mantenerse aparentemente estable en los 100 dólares por barril hasta el 2014 donde ha vuelto a bajar hasta cifras del año 2007, más cercanas a los 60 dólares por barril [12, Narros F.J, 2014].

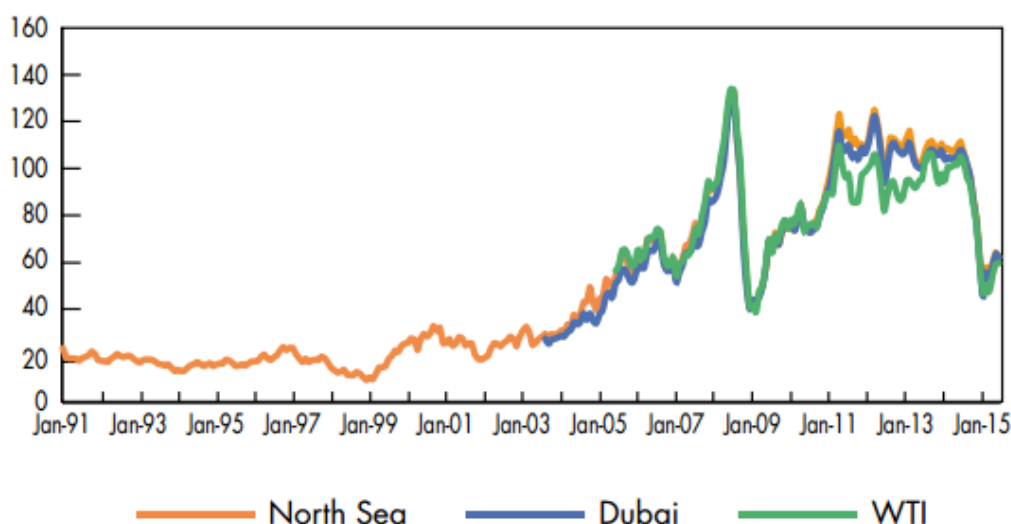


Figura I.5: Precios spot del crudo en dólares americanos / barril [5, IEA, 2015]

Algunas de las causas del bajo precio actual del petróleo son las siguientes: rápido aumento en la producción de petróleo por parte de Norteamérica, ralentización en la demanda mundial y sobre todo en China, los elevados precios anteriores obligaron a algunos países a iniciar una búsqueda propia en aguas más profundas, disminución de la demanda por parte de países desarrollados en busca de mayor eficiencia energética, rivalidad geopolítica de Estados Unidos con Irán, Rusia y Venezuela...



Hay que remarcar que las incertidumbres geopolíticas de la primavera árabe dejaron de afectar en 2011 al precio del crudo.

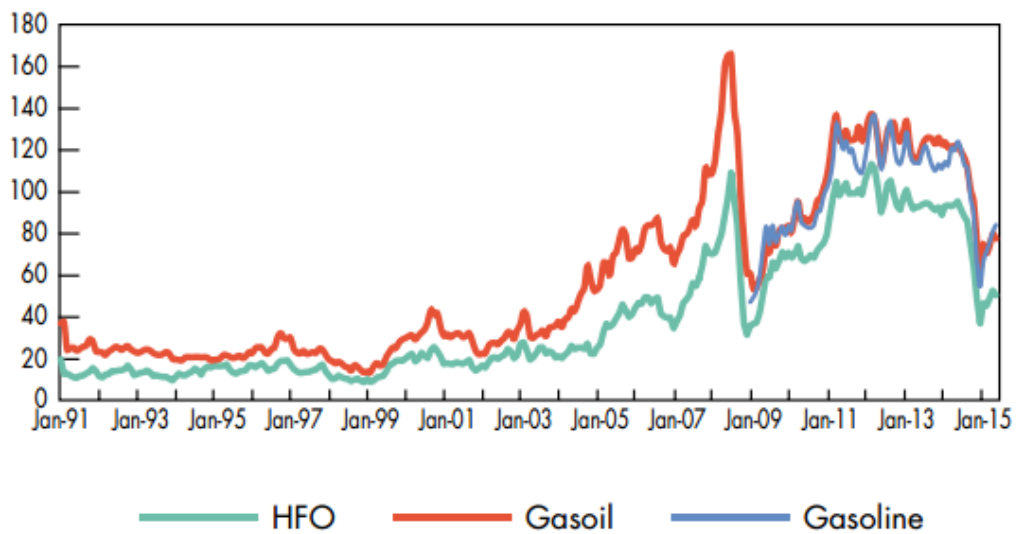


Figura I.6: Precios spot de productos procedentes del crudo en dólares americanos / barril [5, IEA, 2015]

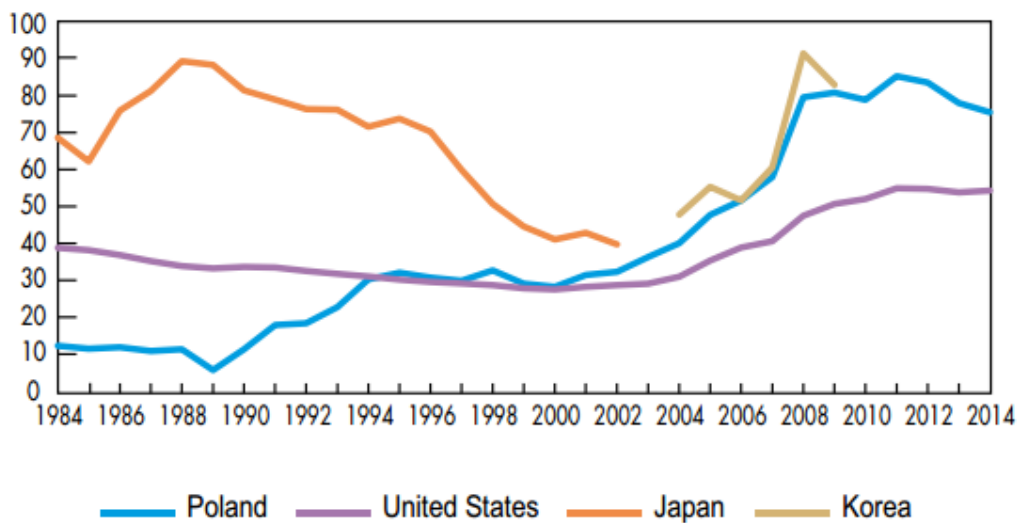


Figura I.7: Precios del carbón térmico en dólares americanos / tonelada [5, IEA, 2015]

En el caso del gas natural la proyección general resulta muy similar a la del petróleo, con la correspondiente estabilidad en años 90, aumento en el año 2000, depresión en el 2008 y estabilidad actualmente. En estados Unidos tiene la amplia ventaja de que el precio se rige por la ley de la oferta y

la demanda local, algo que no ocurre con el petróleo que se rige por la internacional, por otro lado, se han incrementado las reservas y, en consecuencia, las expectativas de producción del país.

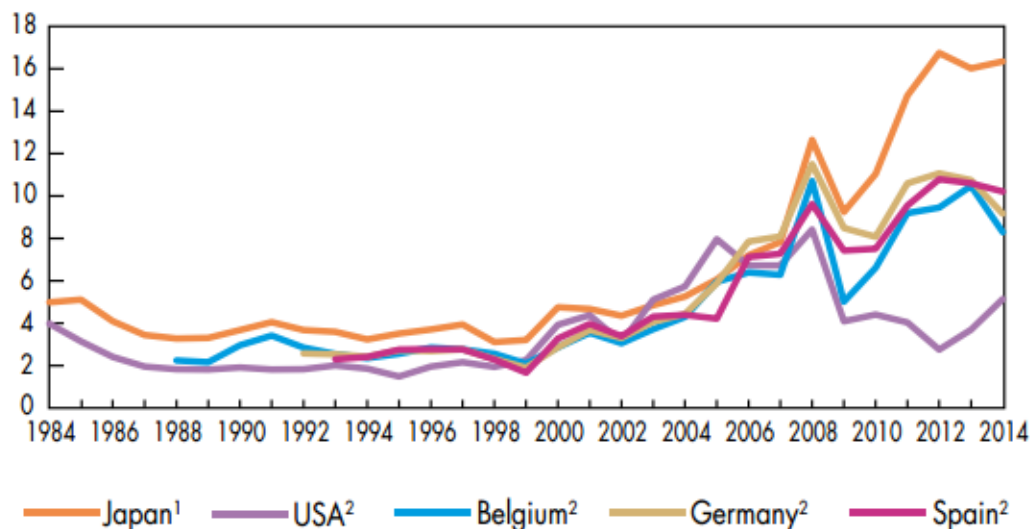


Figura I.8: Precios de importación del gas natural en dólares americanos / MBtu [5, IEA, 2015]

En el próximo gráfico (Figura I.9) se aprecia la importante dependencia actual de los combustibles fósiles en la situación energética global (Figura I.9), donde como dijimos anteriormente, el consumo de petróleo, gas natural y carbón desempeña un papel fundamental [12, Narros F.J., 2014].

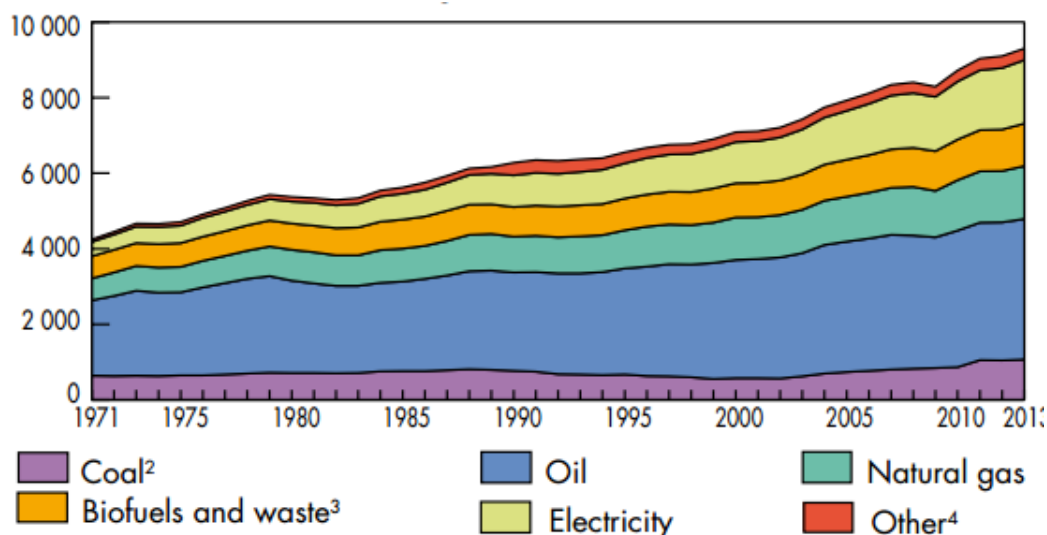


Figura I.9: Evolución del consumo de electricidad según tipo en MToe desde 1971 a 2013 [5, IEA, 2015]



I.1.3. Perspectivas de futuro de los tipos de energía

Hasta aquí se ha resumido de forma rápida la situación actual energética, se han comprobado las energías más utilizadas, sus respectivos precios, y su evolución en ambos casos a lo largo de los últimos años. Tan importante como lo visto es evaluar las perspectivas de futuro que ofrecen cada uno de estos tipos de energía.

Los acuerdos alcanzados anteriormente por la COP21 (Conferencia de las Partes 21) prometen un nuevo impulso hacia un sistema energético más eficiente y con menos emisiones, pero no alteran el panorama actual de crecientes necesidades globales energéticas. En este escenario, la demanda de energía va a aumentar un tercio hasta 2040, debido principalmente a: China, África, Oriente medio y el Sudeste Asiático entre otras muchas. (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico). Los países no pertenecientes a la OCDE representan en su conjunto este aumento de un tercio en el crecimiento mundial energético debido a las tendencias demográficas y estructurales. Los mayores descensos se producen en Europa, Japón y Estados Unidos. Las estimaciones por parte de la COP21 han supuesto una fiable fuente de orientación sobre futuras intenciones en política energética. Los componentes relativos a la energía en los compromisos de esa Conferencia se hallan reflejados en nuestro escenario central, según una detallada evaluación por países.

La ralentización de la economía China hacia un modelo menos intenso en energía va a repercutir a escala mundial debido al gran peso de esta potencia. China es y va a seguir siendo el mayor productor y consumidor mundial de carbón durante el periodo de previsión. Por otro lado el país va a instalar más capacidad de generación de energía renovable que cualquier otro hasta 2030 y es probable que supere a Estados Unidos como mayor consumidor de Petróleo, consolidando así un mercado de crudo mayor que el de la Unión Europea. Se estima que para el año 2040 la demanda energética China duplique a la estadounidense, además al favorecer su economía a la expansión del sector servicios más que a la industria pesada se requerirá un 85% menos de energía que en los últimos años para generar una unidad de industria [6, IEA, 2015].

En cuanto a las decisiones en política energética, China va a introducir un sistema de comercio de emisiones en 2017 para cubrir el sector eléctrico y la industria pesada, para así, moderar la demanda de carbón, que constituye la mitad de la energía usada en China actualmente frente al 3% que había en 2005. Este proceso se verá favorecido también por el amplio



despliegue de energías renovables como: eólica, solar, hidráulica y otro tipo de energías como la nuclear.

La India va a contribuir en la demanda energética con la mayor proporción de crecimiento, aproximadamente un cuarto de la demanda mundial. Este país alberga un sexto de la población mundial y se considera la tercera economía más potente, sin embargo solo engloba el 6% del uso de la energía en el mundo y un 20% de la población no tiene aún acceso a la electricidad. Se están llevando a cabo políticas importantes de modernización y desarrollo que van a lograr que se entre en un periodo sostenido de rápido crecimiento energético. La demanda de carbón va a aumentar al doble convirtiendo así a la India en la mayor fuente de crecimiento mundial de carbón. Por otro lado, la demanda de petróleo va a aumentar más que en cualquier país por encima de los 10 millones de barriles diarios.

Se pretende que para 2030 los combustibles no fósiles supongan un 40% de la generación de energía, por ello, se van a construir grandes presas, centrales nucleares y fuentes de energía solar y térmica.

En cuanto al mercado del petróleo se prevé que este se estabilice en 2020 en 80USD/barril y el precio aumente de manera constante. La demanda aumentará hasta 2020 en unos 900 barriles diarios al año. Por otra parte se plantea un incremento en 103.5 millones de barriles por día en 2040 pero que va a estar atenuado por unos precios mayores, un recorte en las subvenciones hacia este tipo de fuentes de energía y nuevas políticas referentes al aumento de las energías alternativas. Estas políticas harán caer la demanda de petróleo de Estados Unidos, Europa y Japón en unos 10 millones de barriles por día hasta 2040 [6, IEA, 2015].

En cuanto a la oferta, la reducción de los gastos de exploración y producción se estiman en más de un 20% en 2015, por tanto se prevé un aumento en la producción por parte de los países no pertenecientes a la OPEP en algo más de 55 millones de barriles por día antes de 2020. El crecimiento de la oferta por parte de los países de la OPEP será llevado a cabo por Irak e Irán, pero ambos países tienen carencias en infraestructuras e instituciones. Se necesita una inversión anual de 630000 millones de USD para exploración y producción de gas y petróleo, solamente para compensar el descenso de producción de los campos existentes y estabilizar la producción futura.

Por otro lado no se puede desestimar un mayor periodo de precios bajos del petróleo. Se va a examinar que se necesita para que esto ocurra y qué consecuencias puede tener a corto y largo plazo en este sector. Por ahora el precio del petróleo ronda los 50USD/barril de media y se prevé así hasta principios del año 2020, progresivamente va a subir hasta alcanzar los



85USD/barril en 2040. Esto se base en algunas hipótesis como pueden ser: crecimiento más lento de la economía global a corto plazo, políticas y economías de Oriente Medio más estables, un cambio en la estrategia de producción de la OPEP para asegurar una mayor cantidad de productos en este mercado y un suministro más reciente de los países no miembros.

Hay que resaltar que la probabilidad de que este mercado evolucione como se ha mencionado en el párrafo anterior es improbable debido al efecto de los ingresos de los productores: a pesar del aumento en la producción de petróleo, los ingresos de la OPEP han descendido un cuarto respecto al escenario central.

En el caso del gas natural, este se emplea frecuentemente como sustitutivo de combustibles con altos niveles de CO₂. Actualmente, debido a un aumento en el consumo de casi el 50%, ha pasado a ser el combustible fósil de mayor crecimiento, donde China y Oriente Medio son los principales centros de crecimiento de este gas, convirtiéndose así en mayores consumidores que la Unión Europea donde el consumo de gas es probable que no vuelva a los niveles de 2010.

Si se observan los precios bajos del gas en Norteamérica y el descenso de los precios de otras partes debido a la gran demanda, es obvio que hay una gran cantidad de gas natural a precios muy competitivos esperando compradores. Pero esta expansión se va a ver frenada por las políticas de eficiencia en el sector de los edificios y por la competencia de las energías renovables y el carbón en unos pocos casos, incluso podría verse más afectada la demanda en caso de que la inversión en el entorno de precios bajos actual se tradujera en mercados más ajustados en el año 2020. Hablando del aumento pronosticado en la demanda, hay que puntualizar que una quinta parte de este se corresponde con el transportado a lo largo de largas distancias a través de gaseoductos. Mantener bajo control los costes de estos proyectos va a ser vital para la competitividad del gas en los próximos años [6, IEA, 2015].

El ritmo de crecimiento de este gas por parte de China constituye una incertidumbre importante en el mercado global. Ya hay intenciones de promover políticas que animen este desarrollo con una producción que se prevé que supere los 250000 millones de metros cúbicos en 2040 [6, IEA, 2015]. Pero existen una serie de factores que pueden suponer un obstáculo para un aumento rápido de la producción como pueden ser: disponibilidad limitada de agua, densidad de población en zonas ricas en recursos, regulaciones de precios, acceso a recursos...



A la hora de hablar del carbón, este combustible aumentó en el total energético mundial un 23% en 2000 y ha logrado actualmente situarse en un 29%, pero este impulso se está desvaneciendo. Las expectativas de un fuerte crecimiento en la demanda generaron un aumento en el número de inversiones en la oferta de este, sobretodo en China. Pero el uso de este combustible no ha sido el esperado, por lo que se ha sobreexplotado el recurso dando lugar a un desplome de los precios y a una sobrecapacidad.

El carbón ha crecido un 45% en la última década y se prevé que hasta 2040 crezca un 10% adicional. Esto se puede deber a que los principales países demandantes de Carbón son la India y el Sudeste Asiático donde esta se ha triplicado y que en los países de la OCDE se estima que el carbón va a caer en torno a un 40% durante el mismo periodo. En 2040 el consumo de Carbón por parte de la Unión Europea va a rondar un tercio de lo que actualmente es consumido, en cambio China se está convirtiendo es una apuesta segura para los mercados. Por otro lado, estudios afirman que para 2040 Asia consuma un 80% del Carbón producido a nivel mundial y que este constituya la energía básica en muchos países del escenario central. Hay que destacar que su uso solo será compatible con una serie de medidas políticas medioambientales, con avanzadas tecnologías que reduzcan su contaminación y un uso más eficiente [6, IEA, 2015].



I.1.4 Impacto ambiental

El principal problema derivado del impacto ambiental es el cambio climático, fenómeno generado en su mayor parte por los diferentes gases de efecto invernadero (Figura I. 10 y Figura I.11) (Actividades relacionadas con energía generan el 80% de las emisiones a escala mundial). Estos gases derivan del consumo y la transformación de energía, por tanto, debido al aumento constante de la demanda de energía, el cambio climático está cada vez más presente, de tal manera que a este ritmo, las emisiones actuales habrán aumentado un 20% en el año 2020. Se podría afirmar en este caso que las políticas actuales carecen de la eficacia necesaria para solventar este problema.

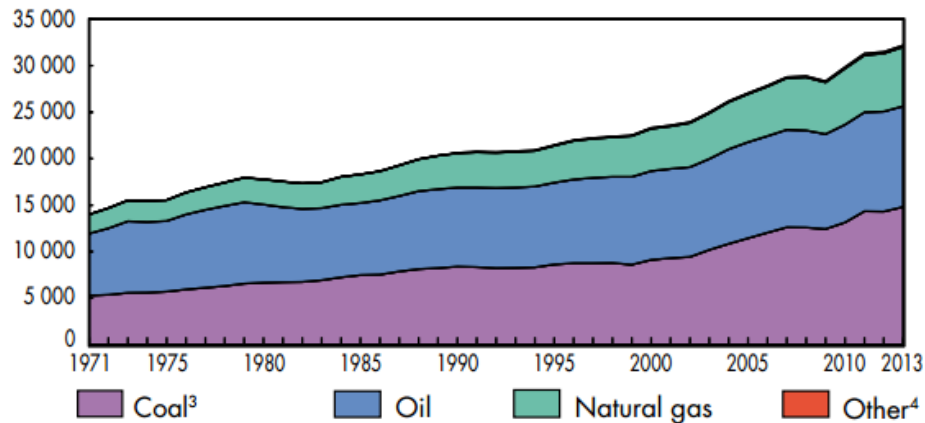


Figura I.10: Emisiones mundiales de CO₂ por combustible en Mt de CO₂ [4, IEA, 2015]

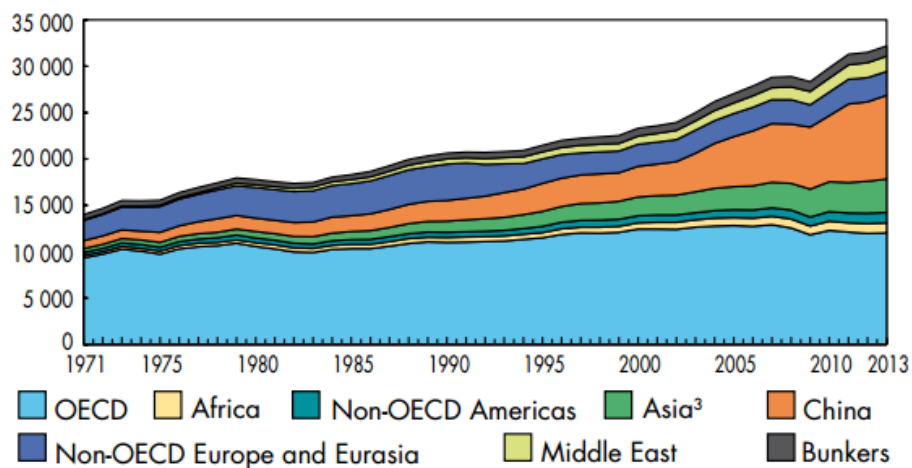


Figura I.11: Emisiones mundiales de CO₂ por región en Mt de CO₂ [4, IEA, 2015]

Este aumento de las emisiones queda patente en la siguiente imagen. Este aumento ha generado un notable incremento de temperatura (Figura I.12) en la tierra, generando así una situación casi insostenible que ha llevado a tomar medidas de urgencia.

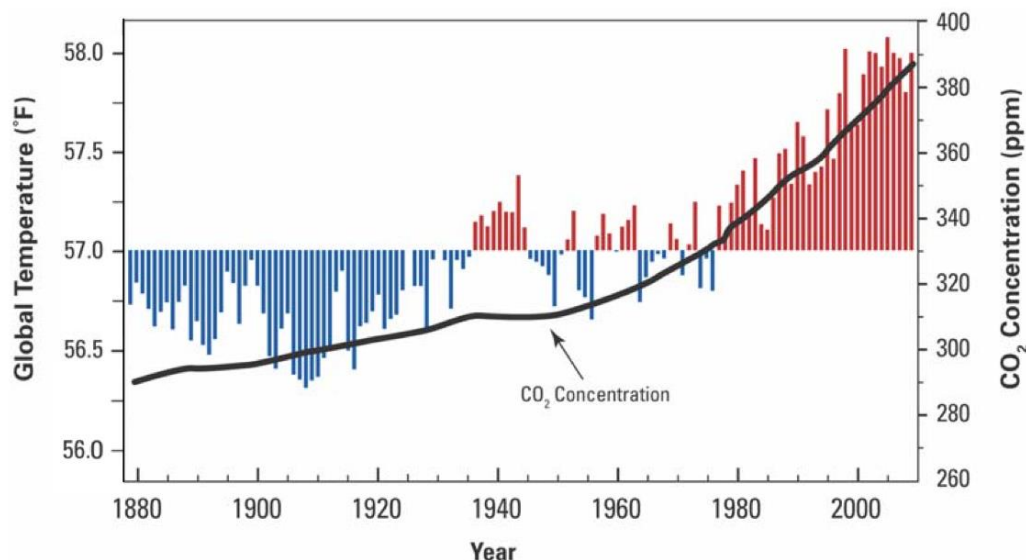


Figura I.12: Temperatura media global en Fahrenheit durante el último siglo, Concentración media de CO₂ en la atmósfera en partes por millón [10, NOAA, 2009]

La convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático tiene como objetivo prioritario reducir la concentración de gases de efecto invernadero a un nivel tal que no interfiera con peligrosidad con el cambio climático. Dentro de esta convención se estableció el protocolo de Kioto, en vigor ya desde 2005, por el cual quedan limitadas las emisiones de estos gases de efecto invernadero: CO₂, CH₄, N₂O, PFC's, HCFC's y SF₆.

Este protocolo, como ya se ha mencionado antes, tiene como objetivo la reducción de los gases de efecto invernadero a niveles inferiores a 1990 en un 5.1% para los países más industrializados y para los que tienen economías de transición. En el caso de Europa el objetivo partía de reducir en un 8% las emisiones de 1990 para el periodo 2008-2012.

El papel del sector energético en el desarrollo económico es fundamental. Las medidas en el campo energético han de ser compatibles a tres principios fundamentales: seguridad de abastecimiento, competitividad y protección del medio ambiente. Asimismo el sector energético es la fuente más importante de gases de efecto invernadero ya que comprende: la extracción, producción, transporte y uso de la energía. Los gases que más



intervienen a este efecto son el CO₂ y el CH₄, ambos procedentes mayormente de la combustión de combustibles fósiles, de las minas de carbón y de instalaciones de hidrocarburos y gas. El sector transformador de los combustibles en electricidad contribuye al efecto invernadero aportando un porcentaje del orden del 30% de los gases de efecto invernadero.

En el caso de España (Figura I.13), la aceptación del protocolo de Kioto genera una serie de situaciones. España es actualmente uno de los países que más ha aumentado sus emisiones respecto a 1990, como en cualquier país la mayor parte de estas emisiones provienen del sector energético, es por ello que, solo una incentivación adecuada de las energías renovables puede realmente a ayudar a disminuir este número de emisiones [7, MAAMA, 2016].

La crisis de 2008 posibilitó el descenso de las emisiones de gases de efecto invernadero aunque no se llegó a valores inferiores a los obtenidos en 1990. Este descenso todavía se ve reflejado en las emisiones actuales. En el año 2012 la aportación de gases de efecto invernadero bajó un 1,9% respecto al año anterior, aunque todavía un 20% mayor a la aportación de 1990, superando así el 15% asignado por el Protocolo de Kioto.

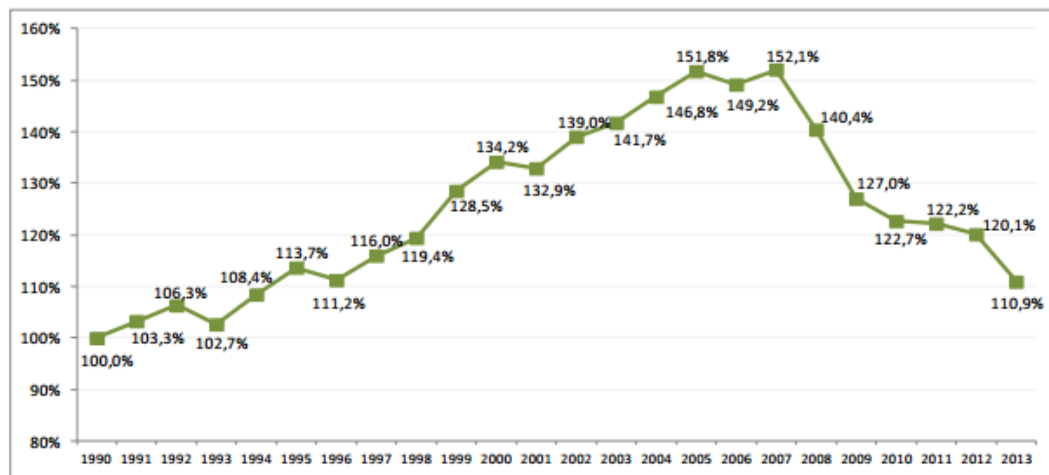


Figura I.13: Evolución de gases de efecto invernadero en España 1990-2013 [7, MAAMA, 2016]

Esta disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España en 2012 se puede atribuir en su mayor parte al efecto de la crisis económica, que ha causado disminuciones en el consumo de electricidad, uso de vehículos... Ese año el 80% de las emisiones fueron debidas al sector energético, tomando gran importancia la generación de electricidad y el



transporte por carretera, y menor importancia: refinerías de petróleo, consumos energéticos de la industria y consumo residencial y de servicios.

La generación de electricidad ha generado un notable aumento de las emisiones, siendo este sector donde más posibilidades existen de reducir las emisiones a un menor coste. Las energías renovables actualmente evitan la emisión de más de 40 millones de toneladas de CO₂ cada año, por lo que la aportación de este tipo de energías como la eólica a este resultado es muy importante al cubrir cerca de un 30% de la generación de electricidad, muy por encima de la energía nuclear. Por otro lado, la generación de electricidad mediante el carbón aumentó en un 35,2% en 2012 y explica el aumento de las emisiones en este sector de generación eléctrica de 8 millones de toneladas de CO₂ respecto al año anterior [7, MAAMA, 2016].

Respecto al transporte, este ha aumentado un 43.7% desde 1990 hasta 2012 y supone un 21.7% del total. El transporte por carretera fue líder en emisiones hasta 2008, año en el que sufrió un estancamiento debido a la crisis. Esa reducción de las emisiones fue debida al aumento de los precios del combustible, a la disminución de los desplazamientos laborales y de mercancías.

Como se ha indicado antes, España es uno de los países industrializados que más ha aumentado el nivel de emisiones desde 1990, por lo que es necesario el establecimiento de una senda de objetivos ambiciosos en cuanto a emisiones para los próximos 30 años. En este aspecto España se encuentra con la oportunidad de aumentar sus aspiraciones ya que el objetivo para sectores difusos es la disminución de emisiones en un 10% para el año 2020, lo cual supone aumentar las emisiones actuales y no facilita la creación de medidas de eficiencia energética a largo plazo.

Hay que tener en cuenta que no solo los gases de efecto invernadero suponen un problema medioambiental. La calidad del aire que se respira ve mermada por el aumento de la contaminación generada por estos gases. Es por ello que se ha reducido el uso del carbón, ya que los gases generados por este combustible contribuían de forma importante a la generación de lluvia ácida [7, MAAMA, 2016].

I.2. Problemática energética en la edificación

Una vez teniendo una base de la situación energética actual, la conclusión principal que se puede extraer es que el objetivo primordial es el ahorro y la eficiencia energética. Para alcanzar este objetivo se han de conocer los puntos de consumo y actuar adecuadamente sobre ellos para lograr esta eficiencia energética. El consumo se puede dividir en 4 sectores principales: Industria, Residencial y otros, transporte y usos no energéticos. En este gráfico (Figura I.14) se muestra la previsión de consumo de cada uno de estos sectores hasta 2020. En resumen en el sector industria y en usos no energéticos la tendencia es descendente, mientras que en transporte y residencial esta es creciente, es por tanto necesario buscar formas de ahorro energético alternativas para estos dos sectores.

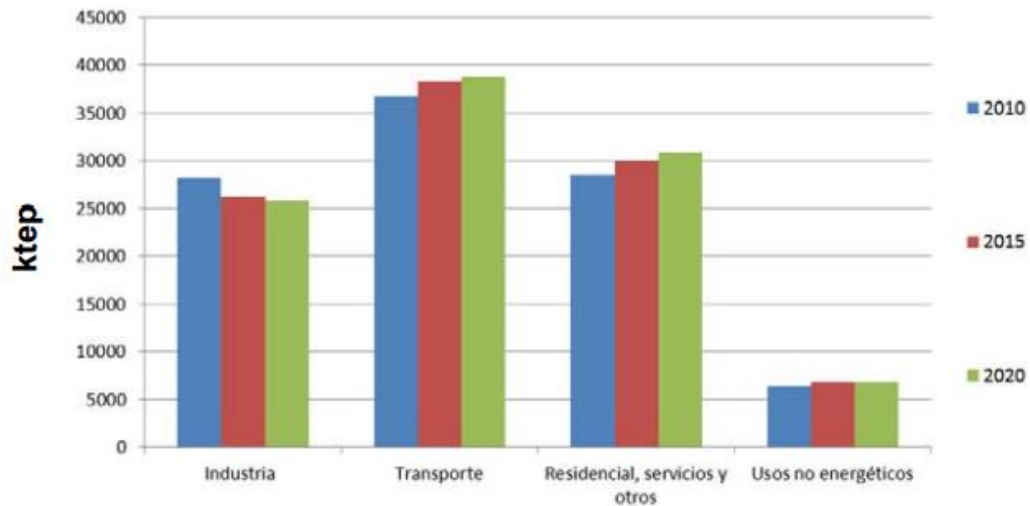


Figura I.14: Previsión del consumo de energía por sector [9, Minetur, 2012]

En el sector del transporte, en el que el crecimiento es mayor que en los otros sectores, es actualmente objeto de medidas y estadísticas para promover un sistema de transporte más eficiente y ecológico para el medio ambiente. Se prevé una moderación en el crecimiento de la demanda energética en este sector. En la próxima década, se espera un crecimiento amplio del sector automóvil hasta niveles de países de mayor renta, este será, en el sector de transporte, el grupo que más crezca seguido por el aéreo.

Los consumos específicos de los nuevos automóviles se irán reduciendo en consecuencia a las nuevas mejoras tecnológicas, en su mayor parte forzadas por leyes de protección del medio ambiente. Por otro lado, el



consumo energético en el transporte se irá reduciendo debido a la potenciación del transporte alternativo frente al vehículo privado.

Sobre un parque estimado en 2020 de 25 millones de automóviles sustituibles por vehículos con uso de energía eléctrica, se considera que el 10% serán de este tipo, de los cuales, medio millón serán eléctricos y dos millones híbridos enchufables. El consumo eléctrico de los mismos será de algo más del 1% de la demanda final de dicho año, pero sustituirán cerca de 1,2 millones de toneladas equivalentes de petróleo [9, Minetur, 2012].

El consumo energético final de la industria bajará moderadamente en todo el período de previsión en consecuencia de la estabilización en la capacidad de producción de los sectores de mayor consumo energético y a la mejora de eficiencia energética derivada de la introducción de nuevas tecnologías. El escenario de precios energéticos favorecerá esta mejora con el objetivo de mantener competitividad.

Englobando al sector residencial, se estima que se va a registrar una moderación en el crecimiento del consumo de energía en los próximos años, como consecuencia del aumento de número de hogares. A pesar de este bajo crecimiento en el número de hogares, se prevé una continuación en el aumento del consumo eléctrico, dado que el equipamiento en electrodomésticos y climatización tiene aún un importante potencial de crecimiento. Por otro lado, las medidas de eficiencia seguirán incentivando el cambio de equipos domésticos por otros más eficientes.

El sector servicios mantendrá un crecimiento tanto en actividad como en consumo energético y su intensidad energética bajará en menor medida que en otros sectores, dado que el mayor uso de la energía eléctrica será llevado a cabo por subsectores relacionados con la informática y las telecomunicaciones. Por tanto en este sector se dispone de un mayor potencial de mejora de eficiencia energética, como puede ser en equipamientos eléctricos de oficinas y en otros edificios del sector terciario (hospitales, hoteles...).

A la vista de todo lo anterior, se aprecia que el sector de la edificación y su equipamiento (sector que engloba al sector doméstico y al sector servicios), que es en el que se centra este trabajo, es el de mayor potencial de ahorro energético ya que lleva asociado gran parte del consumo final de energía por lo que se estima que un 20% de ese consumo podría ahorrarse. Por todo ello parece normal el planteamiento de un estudio referente a la eficiencia energética en este sector de la edificación y su equipamiento teniendo en cuenta dos subsectores como son el sector del hogar y el sector servicios [9, Minetur, 2012].



I.2.1. Consumo Energético en la Edificación y su Equipamiento

El sector de Edificación y Equipamiento comprende, según de el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, los servicios que tienen un mayor peso sobre el consumo energético de los edificios, como son: las instalaciones térmicas de calefacción, climatización, ventilación y producción de agua caliente sanitaria, las instalaciones de iluminación interior, así como el resto de equipamiento habitual en función de los sectores de actividad (electrodoméstico, frío comercial e industrial, ofimática)

El consumo de energía final de este sector (Figura I.15) ascendió, en el año 2010, a 24.391 ktep (Kilotoneladas equivalentes de petróleo), sobre un consumo total nacional para usos energéticos de 93.423 ktep, lo que equivale al 26,1% del consumo de energía total nacional para usos energéticos. De este consumo el 68% correspondieron al sector de edificios de uso doméstico, es decir un 17,5% del consumo energético nacional y un 32% al sector de edificios destinados a servicios, que representan un 8,6% sobre el consumo energético total nacional [11, MITYC, 2011].

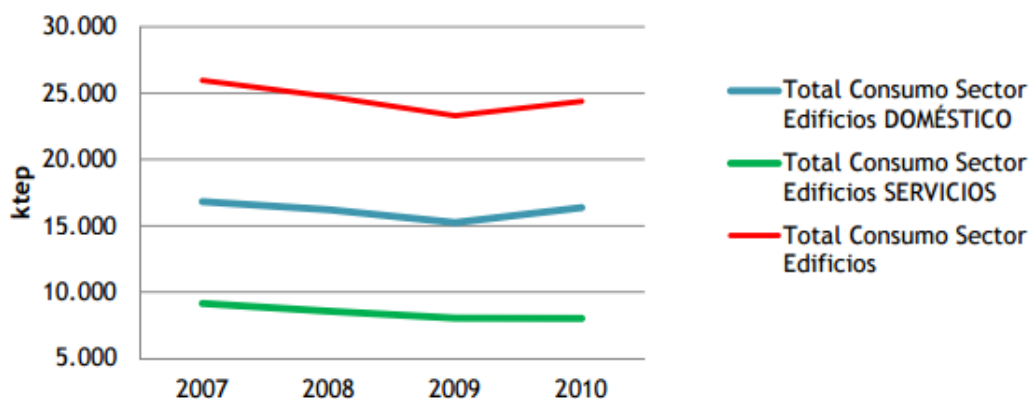


Figura I.15: Evolución de consumos del sector Edificios en el período 2007-2010 [11, MITYC, 2011]

En cuanto al tipo de energía utilizada en cada caso, si se reparte el consumo del sector doméstico (Figura I.16) entre térmico y eléctrico, se observa que el consumo térmico es aproximadamente 11223 ktep en 2010, y el eléctrico 5154 ktep, por tanto el consumo térmico equivale a cerca del doble del consumo eléctrico para ese mismo año. El consumo medio anual de un hogar español es de 10521 kWh.

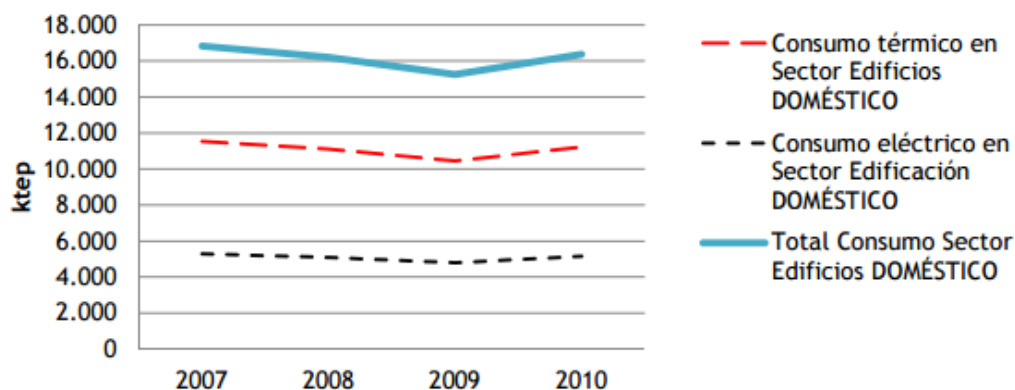


Figura I.16: Evolución de consumo del sector Edificios doméstico en el período 2007-2010 [11, MITYC, 2011]

Para el caso del consumo en el sector Servicios (Figura I.17), la variación a lo largo de los años es apreciable, con un aumento en el consumo eléctrico de 5.387 ktep en 2010, frente a una disminución del consumo térmico de 2.627 ktep en 2010.

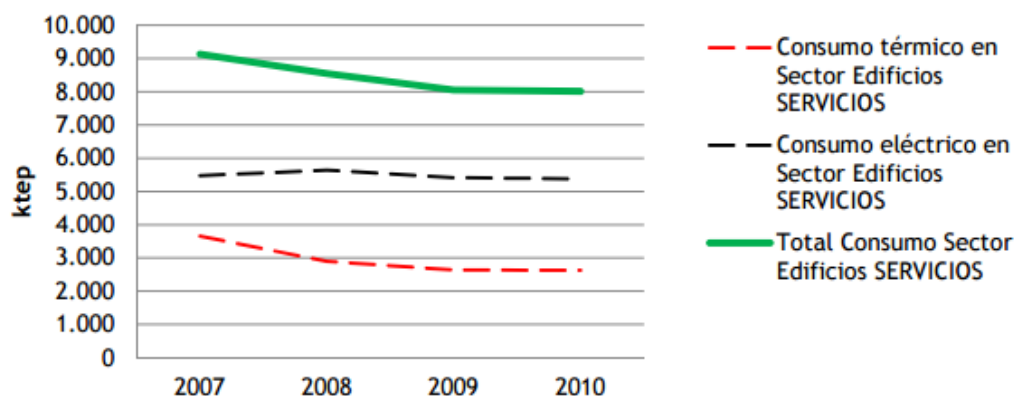


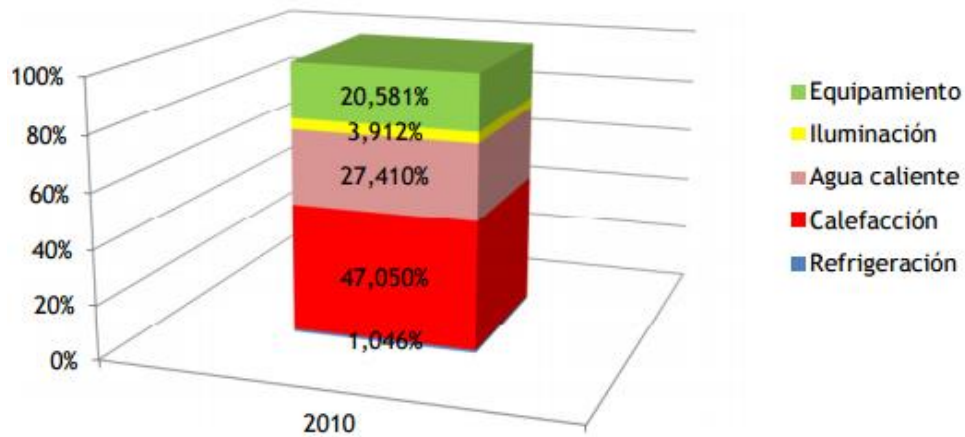
Figura I.17: Evolución de consumo del sector Edificios servicios en el período 2007-2010 [11, MITYC, 2011]

El balance de energía final consumida para el año 2010 en este sector indica que más del 42,5% está destinado a calefacción, seguido por un 19,6% a Actividades de Construcción y Servicios, un 19,4% en el equipamiento, un 9,6% en iluminación y un 8,9% en refrigeración [11, MITYC, 2011].

Hay que hacer un énfasis en que las instalaciones térmicas de la vivienda (calefacción y agua caliente sanitaria) representan casi tres cuartas partes del consumo energético del sector.

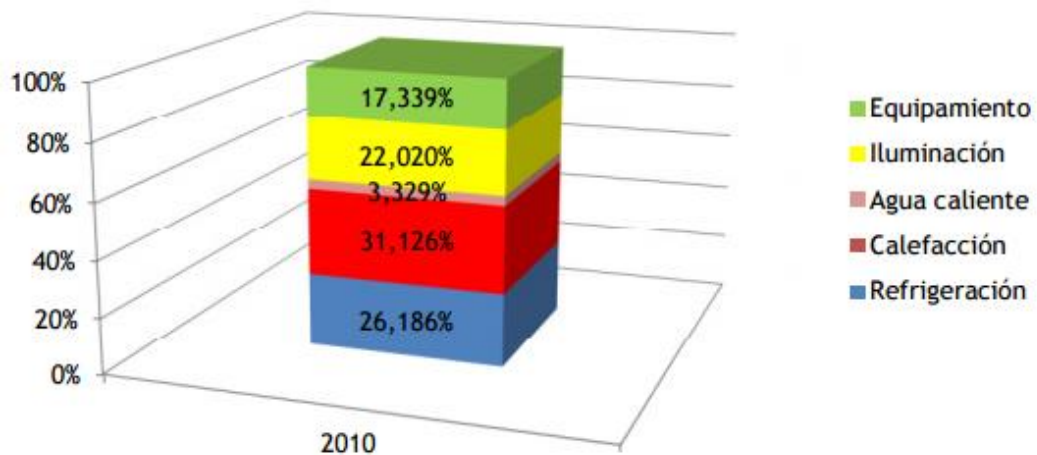


La distribución por usos del consumo de energía final en los edificios del sector Doméstico (Figura I.18) es la siguiente: calefacción (47%), agua caliente sanitaria (27,4%), equipamiento (20,6%), iluminación (3,9%) y aire acondicionado (1,1%). El aire acondicionado, dada su estacionalidad, no representa actualmente un porcentaje de consumo importante, aunque contribuye a generar picos de demanda energética que contribuyen a ocasionar problemas suministro eléctrico en los periodos de verano [11, MITYC, 2011].



Figural.18: Distribución del consumo en el sector Edificios Doméstico 2010 [11, MITYC, 2011]

En lo que respecta a la parte del sector servicios (Figura I.19), la distribución es: calefacción (31,1%), aire acondicionado (26,2%), iluminación (22%), equipamiento (17,3%) y agua caliente sanitaria (3,3%). Se pueden observar valores más altos para iluminación y refrigeración en el sector Servicios, mientras que baja el agua caliente sanitaria respecto al doméstico.



Figural.19: Distribución del consumo en el sector Edificios Servicios 2010 [11, MITYC, 2011]



Dentro de la distribución de consumos en edificios (Figura I.20) del sector servicios y usos diferentes al de vivienda, son los edificios de uso administrativo los que tienen mayor peso en el consumo de energía (50%), seguido por los destinados al comercio (30%), los restaurantes y alojamientos (8%), sanitarios (7%) y por último los educativos (5%) [11, MITYC, 2011].

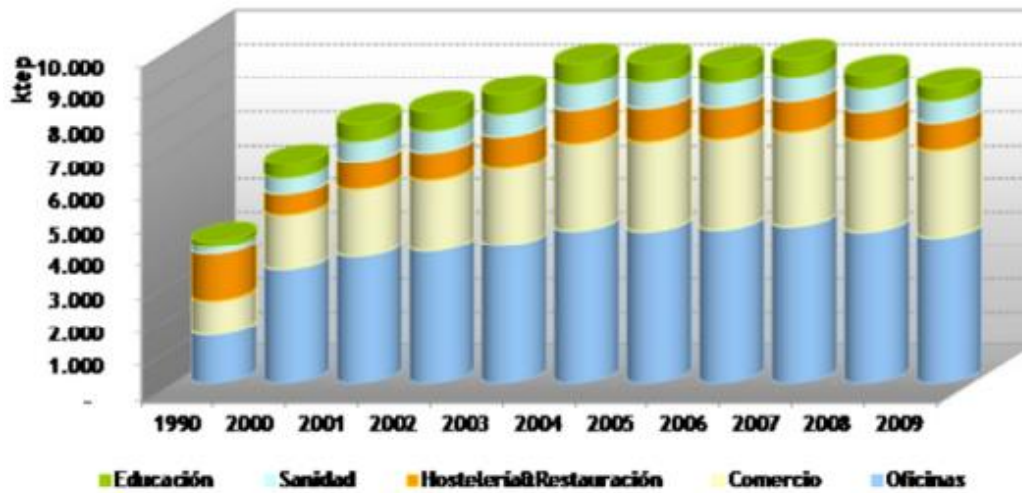


Figura I.20: Consumo en el sector servicios entre 1990 y 2009 [11, MITYC, 2011]



I.2.2. Balance del Sector Edificios

La actividad relacionada con el ahorro y la eficiencia energética en el sector Edificios se enmarca en las políticas de actuación que proponen estas dos Directivas:

- Directiva 2010/31/UE, 19/5/2010, sobre la eficiencia energética de los edificios, como refundición de la anterior Directiva 2002/91/CE.
- Directiva 2006/32/CE, 5/4/2006, sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos.

La Directiva de Eficiencia Energética de Edificios, establece los requisitos mínimos de eficiencia energética que deben cumplir tanto los nuevos edificios como los existentes, su certificación energética, así como las inspecciones periódicas de eficiencia energética a las que se han de someter.

En cuanto a la Directiva de uso final de la energía y de los servicios energéticos, la actividad se ha realizado en tres aspectos principales. En el legislativo, modificando la Ley de Contratos del Sector Público, posibilitando así la contratación en la modalidad de servicios energéticos, en el económico, desarrollando líneas de financiación y de ayudas específicas para el apoyo en la ejecución de las medidas de ahorro energético, y por último, mediante campañas de formación, información y concienciación.

Ahora se va a realizar un breve análisis del “Balance de la trasposición y aplicación en España de la Directiva 2002/91/CE,” relativa a la eficiencia energética de los edificios [11, MITYC, 2011].

Introducción

La transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 16/12/2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios ha sido realizada, en lo que respecta a requisitos mínimos de eficiencia energética, inspección periódica de eficiencia energética de las instalaciones térmicas y certificación energética de edificios mediante los siguientes Reales Decretos:

- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo [N-1], en el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE).
- Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, en el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación energética de edificios de nueva construcción.
- Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio [N-2], en el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).



- Real Decreto de certificación energética de edificios existentes que completa la transposición de la Directiva 2002/91 al ordenamiento jurídico español.

Requisitos mínimos de eficiencia energética en edificios e inspección periódica de eficiencia energética en instalaciones térmicas

- Limitación de la demanda energética de calefacción y refrigeración:

El Código Técnico de la Edificación, incluye el Documento Básico de Ahorro de Energía. La primera parte de este documento lleva por nombre HE1 - Limitación de demanda energética que sustituyó a la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios. El cumplimiento de esta exigencia puede verificarse mediante una opción prescriptiva, mediante tablas y otra opción prestacional, basada en un programa informático que compara la demanda energética de calefacción y refrigeración del edificio a estudiar, con la de un hipotético edificio de referencia que cumple estrictamente la legislación vigente.

- Rendimiento de instalaciones térmicas e inspección periódica de eficiencia energética:

La eficiencia energética de las instalaciones térmicas de calefacción, refrigeración, ventilación y producción de agua caliente sanitaria y las inspecciones periódicas de eficiencia energética están reguladas por el documento HE2 (Rendimiento de las instalaciones térmicas, cuyo contenido está desarrollado en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios). Este reglamento regula el diseño y dimensionado, montaje, mantenimiento e inspección de las instalaciones térmicas. La inspección periódica de eficiencia energética de los generadores de frío y de calor es obligatoria para todos los generadores de calor con potencia térmica nominal superior a 20 kW y para todos los generadores de frío cuya potencia nominal sea superior a 12 kW y para la instalación completa cuando su antigüedad supere los 15 años. El contenido de estas inspecciones es fijada por cada comunidad autónoma. Además el Código Técnico de la Edificación exige la utilización de la energía solar térmica para la producción de agua caliente sanitaria y en calentamiento de piscinas en la sección HE4 (Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria) [11, MITYC, 2011].

- Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación

La eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior está regulada en la sección HE3 del CTE. Obliga al cumplimiento de un valor de eficiencia energética de la instalación VEEI ($W/m^2 \times 100 \text{ lux}$) diferente en



función de la zona de actividad del edificio. También incorpora obligaciones relacionadas con la regulación y control de la iluminación y especialmente con el aprovechamiento de la luz natural [11, MITYC, 2011].

Certificación Energética de Edificios

La eficiencia energética de un edificio se determina calculando o midiendo el consumo de energía necesaria para satisfacer anualmente la demanda energética del edificio en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación. La eficiencia energética de un edificio suele expresarse de forma cualitativa o cuantitativa de distintas formas: mediante indicadores, índices, calificación o letras de una escala que varía de mayor a menor eficiencia, determinada convencionalmente.

La calificación energética se expresa a través de varios indicadores que permiten explicar las razones de un buen o mal comportamiento energético del edificio y proporcionan información útil sobre los aspectos a tener en cuenta a la hora de proponer recomendaciones que mejoren dicho comportamiento.

Es necesario comentar las perspectivas de la aplicación de la nueva Directiva 2010/31/CE, relativa a la eficiencia energética de los edificios.

La nueva Directiva 2010/31/UE, 19/05/2010, relativa a la eficiencia energética de edificios, como refundición de la anterior Directiva 2002/91/CE, establece nuevos objetivos para el periodo 2010-2020 en función de los requisitos mínimos de eficiencia energética, certificación energética e inspección periódica de las instalaciones térmicas de los edificios.

En España se ha comenzado a definir la hoja de ruta que debería desembocar en los objetivos marcados por la refundición de la Directiva 2010/31/CE y en este sentido se ha iniciado el proceso de transposición tanto de los requisitos mínimos de eficiencia energética del Código Técnico de la Edificación, RITE como de la certificación energética cuya primera revisión se ha realizado el año 2011.

En general la Directiva precisa y concreta algunos aspectos ya tratados en la Directiva 2002/91/CE, pero en otros casos se trata de importantes modificaciones o novedades como es la metodología de obtención de los requisitos mínimos de eficiencia energética y la promoción de los edificios de consumo casi nulo de energía [11, MITYC, 2011].

I.2.3. Balance Periodo 2011-2020

La evolución en el consumo de energía del sector Edificación y Equipamiento y en las viviendas, está afectada en el periodo 2011-2020 por dos indicadores: el crecimiento de la población y del número de viviendas.

Por lo que respecta a la evolución de la población (Figura I.21) se estima un crecimiento medio de la población a partir de este año, según datos del INE, en torno a 120.000 habitantes/año, lo que supondría un crecimiento total en 10 años del 2,5% la población en España, pasando de 48 millones en 2020 [11, MITYC, 2011].

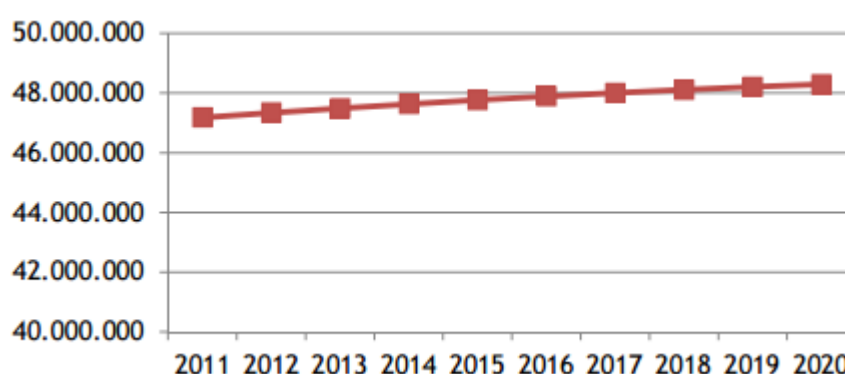


Figura I.21: Previsión de evolución de la población considerada hasta 2020 [11, MITYC, 2011]

Por lo que respecta a la evolución del número de hogares (Figura I.22), se prevé un crecimiento medio de los hogares en este periodo en torno de 138.000 hogares anuales, lo que supondría un crecimiento en 10 años del 8%. Por tanto, se pasaría de un hogar medio con 2,7 personas por hogar a 2,56 personas por hogar en el 2020. Así, se incrementaría el número de hogares en 1,3 millones, llegando hasta los 18.800.000 millones en 2020.

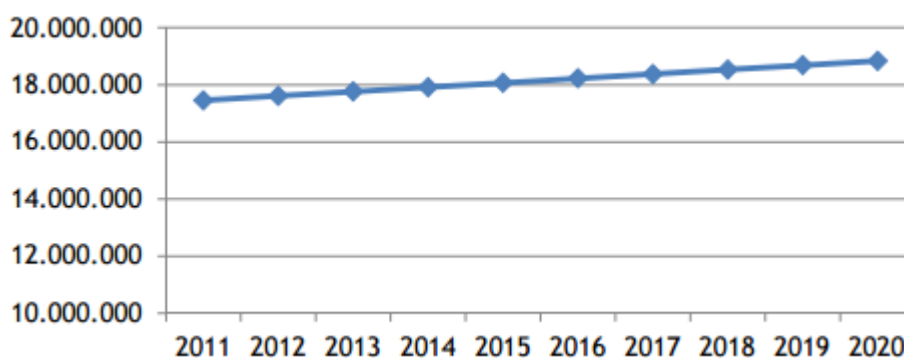


Figura I.22: Previsión de la evolución de los hogares considerada [11, MITYC, 2011]



Como se ha mencionado antes, una forma de medir la eficiencia energética en el sector de la edificación es mediante el uso de la calificación energética de los edificios. Los edificios de nueva construcción o aquellos existentes con una superficie útil superior a 1.000 m² en los que se realice una modificación o reforma, donde se renueve más del 25% del total de sus cerramientos, deben disponer de forma obligatoria de un certificado de eficiencia energética.

Partiendo de los diferentes certificados energéticos registrados en los órganos competentes de las comunidades autónomas desde el año 2007 y de estudios realizados sobre el nivel de eficiencia energética del parque existente se ha previsto el gráfico siguiente (Figura I.23). La información disponible se refiere solo a cuatro Comunidades Autónomas, por lo que la muestra es poco representativa. Hay que recordar que el número de comunidades autónomas que tienen implantado un registro de certificados energéticos es muy bajo, debido a que solo han pasado 4 años desde su entrada en vigor. La falta de datos no permitirá atender debidamente las obligaciones que España tiene como estado miembro ante la Comisión Europea, por lo que se debe pedir la colaboración autonómica eficaz y en el tiempo debido en el proceso de desarrollo de la legislación autonómica que establezca mecanismos de registro, control e inspección [11, MITYC, 2011].

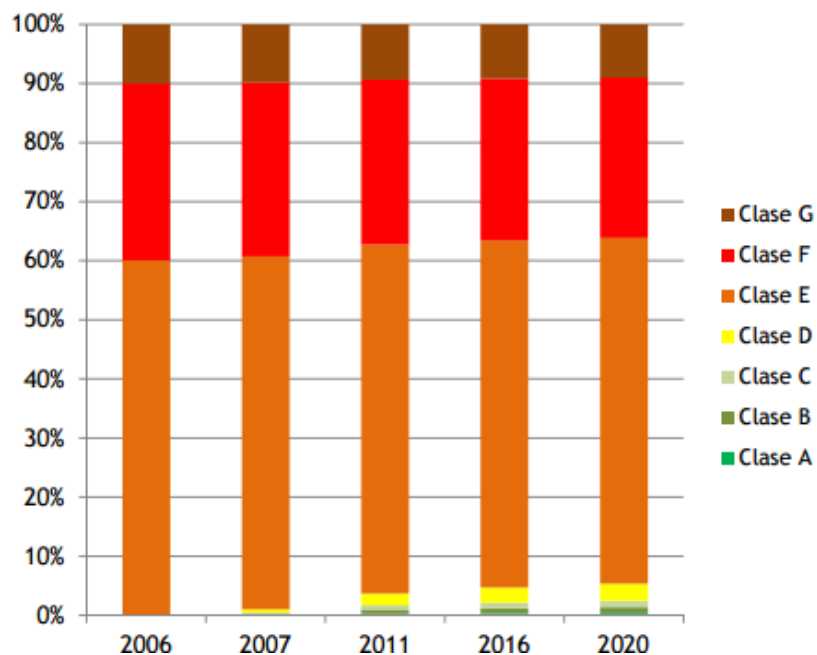


Figura I.23: Previsión de la evolución de la clase energética en los edificios [11, MITYC, 2011]



Se observa que los edificios actuales construidos con anterioridad a 2007 se encuentran en su mayoría en las clases de eficiencia E y F y a partir de ese año con la entrada en vigor del Real Decreto de Certificación y de CTE, han comenzado a evolucionar hacia clases mejores como la D. Por otro lado los nuevos edificios construidos o rehabilitados han contribuido a ello.

Hay que señalar que lo visto en el gráfico se refiere solo a edificios que han obtenido el certificado oficial (nuevos edificios y aquellos sometidos a gran rehabilitación) y no a edificios existentes que en este periodo han llevado a cabo algún tipo de reforma energética, pero que no están obligados a la obtención de un certificado. Por ejemplo, cambio de calderas, mejora de vidrios y carpinterías o del sistema de iluminación. En estos se ha producido una mejora de su clase de eficiencia, pero no queda recogida en un certificado oficial. A partir de la entrada en vigor del nuevo Real Decreto de certificación energética de edificios existentes se podrá tener un conocimiento más exacto de la situación del parque a medida que este parque de edificios se vaya calificando energéticamente.

Desde el año 2007, cuando entra en vigor la Certificación energética de Edificios de nueva construcción, se ha producido un progresivo crecimiento del porcentaje de superficie de edificios con alta calificación energética, letras A y B. Durante el periodo 2011-2020, se prevé pasar del 1% de la superficie del parque de edificios en el año 2011, al 1,4% en el año 2020 [11, MITYC, 2011].



I.3. Medidas en el sector Edificación y Equipamiento

Para evitar que se produzca un incremento del consumo energético en este sector y así poder cumplir los objetivos actuales para 2020, va a ser necesaria la implantación de una serie de medidas contempladas en el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética para este sector. Las medidas son las siguientes:

- Medida 1: Rehabilitación energética de la envolvente térmica de los edificios existentes.
- Medida 2: Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes.
- Medida 3: Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior en los edificios existentes.
- Medida 4: Construcción de nuevos edificios y rehabilitación integral de existentes con alta calificación energética.
- Medida 5: Construcción o rehabilitación de edificios de consumo de energía casi nulo.
- Medida 6: Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de frío comercial.
- Medida 7: Mejora de la eficiencia energética del parque de electrodomésticos.

Para este trabajo se va a estudiar la medida 2, referente a la mejora energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes, ya que es la que tiene mayor relación tiene con este estudio y puede constituir uno de los campos de aplicación de las conclusiones que se obtengan [11, MITYC, 2011].



I.3.1. Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes.

Objetivo

Reducción del consumo de energía de las instalaciones térmicas de calefacción, climatización y producción de agua caliente sanitaria de los edificios existentes [11, MITYC, 2011].

Descripción

Esta medida trata de mejorar la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes que se renueven, de forma que cumplan con las exigencias mínimas que fija la normativa vigente, reduciendo su consumo de energía. Se consideran como instalaciones térmicas de calefacción, climatización y producción de agua caliente sanitaria las destinadas a atender la demanda del bienestar térmico e higiene de las personas.

Las actuaciones energéticas consideradas dentro de esta medida serán todas aquellas que consigan una reducción anual del consumo de energía convencional mediante modificaciones en sus instalaciones de calefacción, climatización y producción de agua caliente sanitaria y que se justifiquen documentalmente. Por otro lado, deberán cumplir con la normativa que establezca el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) y demás normativa vigente en la materia.

Las actuaciones energéticas podrán ser, con carácter orientativo y no limitativo, las siguientes:

- Sustitución de equipos de producción de calor y frío por otros equipos de mayor eficiencia energética, seleccionados en base a un mayor rendimiento energético, tanto para instalaciones de tipo individual como centralizado.
- Sustitución de equipos de movimiento de los fluidos caloportadores por otros de elevada eficiencia energética. Incluirá la mejora del aislamiento térmico de la redes de tuberías y dispositivos que limiten las pérdidas en el transporte de fluidos térmicos.
- Sistemas de enfriamiento gratuito mediante aire exterior y de recuperación de calor del aire de extracción.



- Sistemas que combinen equipos convencionales con técnicas evaporativas que minimicen el consumo de energía de la instalación: enfriamiento evaporativo, condensación evaporativa, pre-enfriamiento evaporativo del aire de condensación, enfriamiento evaporativo directo e indirecto previo a la recuperación de calor del aire de extracción... Sistemas de control y regulación de equipos e/o instalaciones que ahorren energía, como por ejemplo, en función de la variación de la temperatura exterior, la presencia o las necesidades del usuario.
- Sistemas de gestión telemática de suministro de agua caliente sanitaria para edificios que permitan este control sobre el consumo de agua caliente sanitaria y energía, limitar el caudal máximo instantáneo, el volumen máximo de uso e incluso el corte del suministro por vivienda y/o estancia. Grifos para el control y gestión de agua caliente sanitaria en el punto de consumo, que permitan una óptima y rápida regulación de temperatura y caudal, que permitan ser controlados directamente por el usuario y, a la vez, mediante sistemas telemáticos, para gestionar y controlar el consumo instantáneo, la temperatura de salida y el volumen máximo de consumo de éstos. Medidas necesarias para establecer una contabilización y telegestión del consumo de energía.
- Integración de los subsistemas térmicas en un sistema domótico que permita la intercomunicación entre los diferentes sistemas, de forma que estos interactúen entre si y puedan ser controlados local o remotamente por el usuario.
- Las nuevas instalaciones de sistemas centralizados de calefacción y refrigeración urbana o de distrito o que den servicio a varios edificios, así como la reforma y ampliación de las existentes. Estarán incluidos los equipos de generación, el tendido de las tuberías de transporte de los fluidos caloportadores, sus sistemas de regulación y control, y la obra civil directamente asignable para implantación de las mismas.

Mecanismos de actuación comprendidos dentro de la medida

- Regulatorios

La fijación de los requisitos mínimos de eficiencia energética que deberán cumplir las instalaciones térmicas nuevas como existentes que se reformen es la fijada por el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios. Durante el periodo de vigencia del Plan estos requisitos se modificarán progresivamente de acuerdo con la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y su marco metodológico que vincula los



aspectos de eficiencia energética con los económicos mediante el cálculo de nivel óptimo de rentabilidad durante el ciclo de vida útil del edificio.

Por otro lado, la aprobación del procedimiento de certificación energética de edificios existentes permitirá valorar objetivamente la mejora de la eficiencia energética del edificio vinculada a la clase energética obtenida tras la reforma propuesta. En el caso de los edificios existentes a los que sea de aplicación obligatoria la certificación ésta les proporcionará un listado de medidas que permita mejorar la calificación energética de partida en uno o dos niveles. Y también por las recomendaciones que se propongan en la inspección de eficiencia energética de las instalaciones térmicas a que vienen obligadas por el RITE todas las instalaciones completas con una antigüedad de más de 15 años y de forma periódica para los sistemas de generación de calor y frío. En la revisión del RITE, se regulará la prohibición de la utilización de combustibles sólidos de origen fósil en las instalaciones térmicas de los edificios.

En la medida que se desarrollen sistemas de etiquetado energético de aparatos concretos o se modifiquen los actuales se vincularán los objetivos del Plan a las mejores clases de eficiencia energética disponibles en el mercado.

- Incentivos económicos

Los mecanismos de ayuda podrán basarse en subvenciones directas de capital o bonificación al tipo de interés del préstamo necesario para acometer la inversión o cualesquiera otros que resulten adecuados al objeto de la medida.

Serán consideradas actuaciones preferentes aquellas que afecten a un número elevado de edificios, tales como rehabilitaciones de barrios. También las que 230 se realicen mediante “Planes Renove” dirigidos a actuaciones concretas de ciudadanos particularizados para la renovación de aparatos o sistemas. Se tratará de vincular en la medida de lo posible los incentivos económicos a la obtención de niveles de calificación energética, especialmente cuando se trata de rehabilitaciones integrales.

Se priorizarán las medidas que vengan soportadas por el dictamen realizado por el agente autorizado para realizar la inspección periódica de eficiencia energética que establece el RITE.

- Formación

Como complemento a esta medida se diseñarán y realizarán actividades de formación que podrán comprender, con carácter orientativo y no limitativo



cursos de profundización dirigidos a proyectistas, dirección facultativa y a los agentes encargados del control externo de la normativa energética en esta materia, adecuados a las funciones a realizar por cada uno de ellos en este proceso y en particular al procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética y de manejo de los programas informáticos de certificación energética de edificios existentes.

- Información

Con el fin de fomentar la información entre los destinatarios de los aparatos y sistemas más eficientes energéticamente se dispondrá de bases de datos en la Web del IDAE, o de programas de certificación reconocidos, en colaboración con las asociaciones del sector. Para garantizar la veracidad de la información contenida en la base de datos las bases de datos se someterán a controles de verificación adecuados.

- Inspección de mercado

El Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) hace obligatoria la inspección periódica de eficiencia energética, tanto de los generadores de calor y frío como de la instalación térmica completa cuando esta tenga más de 15 años de antigüedad. Como resultado de esta inspección es preceptiva la elaboración de un dictamen por parte del inspector, con el fin de asesorar al titular de la instalación, que contendrá una serie de mejoras o modificaciones de su instalación que permitan mejorar su eficiencia energética. Asimismo, las autoridades competentes deberán realizar una selección al azar de un porcentaje significativo del total de informes de inspección emitidos anualmente y los someterán a verificación.

- Otros mecanismos de acompañamiento

Cuando los aparatos retirados sean susceptibles de un posterior aprovechamiento, en particular en planes Renove, será necesario establecer un sistema que garantice la retirada del equipo para su reciclado y la gestión de sus residuos de acuerdo con la normativa vigente.

Grupo objetivo de la medida

Personas físicas o jurídicas de naturaleza pública o privada (propietarios o titulares de edificios, promotores públicos o privados, comunidades o mancomunidades de vecinos, empresas municipales de la vivienda, empresas de servicios energéticos etc.). 231

Responsabilidad y colaboradores



Los organismos responsables de la ejecución y seguimiento de la medida son el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio/IDAE en colaboración con las Comunidades Autónomas.

Actuaciones y planificación

El desarrollo de esta medida de mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios requerirá actuaciones sobre 8.200 MW térmicos/año, en equipos de producción de frío/calor, distribución, regulación y control y climatizadores. Lo que supondrá para todo el Plan actuar sobre 82.000 MW térmicos, para lo que se requerirá una inversión en sobrecoste por tecnología eficiente de 7.258 M€.

Apoyo a gestionar por el sector público: El apoyo a gestionar por el sector público estimado para el impulso y promoción de esta medida, se ha obtenido como un rango de aportación a un porcentaje de la inversión total requerida, ya que el resto de la inversión se realizará sin apoyo como efecto inducido por el impulso de esta medida en el sector. El apoyo a gestionar por el sector público total en el periodo 2011 - 2020 sería de 283 Millones de Euros. [11, MITYC, 2011].



I.4. Conclusiones

En base a los contenidos de este primer capítulo acerca de la situación energética, se van a presentar las ideas que, derivadas de este tema, pueden ser válidas para una introducción de contenidos referentes a este trabajo:

- Para empezar es importante situarse en un contexto actualizado del aprovisionamiento de energía para ofrecer una correcta valoración de los tipos de energía que, tanto actualmente como en un futuro, tienen un papel importante. Una vez conocidas las energías más comunes, sus evoluciones, sus posibilidades de agotamiento, sus precios, su posible contaminación, etc., es posible la elaboración de un modelo base, mediante el cual, se puedan investigar otros tipos de sistemas capaces de un mejor aprovechamiento energético que muchos de los actuales.
- En el ámbito de la edificación, es conocido que el principal objetivo es el ahorro energético, sin embargo, un porcentaje cercano al 50% del consumo energético es debido a los sistemas de calefacción y refrigeración. En este trabajo se van a explorar nuevas alternativas de mayor eficiencia energética y, por tanto, menor consumo, como pueden ser los edificios activados térmicamente. Estas edificaciones, pueden aprovechar la inercia térmica de materiales como el hormigón a su favor y generar un importante ahorro energético.
- Los estudios y balances periódicos realizados en el sector edificaciones pueden representar dentro de este trabajo el tipo de edificios más propensos para la implantación de sistemas más eficientes según el tipo de certificado energético que tengan.
- La normativa actual, cuyo objetivo es el decremento del consumo energético en los próximos años, muestra diferentes medidas de ahorro y eficiencia energética, por tanto es interesante ver en qué tipo de medidas se pueden implementar estos sistemas y, en caso de las medidas estudiadas, los motivos que pueden llevar a dicha implantación, como puede ser ahorro energético en instalaciones de refrigeración y climatización, o un aumento en la eficiencia energética de las edificaciones contempladas.



I.5. Referencias

- [1] Calero Pérez R.; Carta González J.A.; Padrón Hernández J.M. “Energía”. Año 2012
Disponible en:
<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/doc/pdf/capitulo10.pdf>
- [2] Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). “Memoria anual 2013”. Año 2013.
Disponible en:
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Memoria_IDAE_2013_4c4855ac.pdf
- [3] “BP Statistical Review of World Energy June 2015”. Año 2015.
Disponible en:
<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>
- [4] Expansión “La OPEP prevé un consumo récord de petróleo en 2016”. Año 2015.
Disponible en:
<http://www.expansion.com/empresas/energia/2015/08/11/55ca015aca474183048b4581.html>
- [5] International Energy Agency “Key World Energy Statistics”. Año 2015.
Disponible en:
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf
- [6] International Energy Agency “World Energy Outlook 2015”. Año 2015.
Disponible en:
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WE02015ES_SPANISH.pdf
- [7] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. “Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 – 2014 Edición 2016”. Año 2016.
Disponible en:
http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/nir_ed2016_def1_tcm7-417776.pdf
- [8] Asociación Empresarial Eólica (AEE). “REVE-Informe de las emisiones de gases de efecto invernadero en España 1990-2012”. Año 2013
Disponible en:
<http://www.expansion.com/empresas/energia/2015/08/11/55ca015aca474183048b4581.html>



[aca474183048b4581.html](#)

- [9] Minetur “Planificación energética indicativa según lo dispuesto en la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible”. Año 2012.
Disponible en:
http://www.minetur.gob.es/energia/esES/Novedades/Documents/Planificacion_indicativa_2012-2020.pdf

- [10] National Centres for Environmental Information (NOAA) “Estudios y evidencias del calentamiento global”. Año 2009
Disponible en:
<http://cambioclimaticoglobal.com/estudios-y-evidencias-del-calentamiento-global>

- [11] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (MITC) “Plan de acción de ahorro y eficiencia energética 2011-2020”. Año 2011
Disponible en:
http://www.minetur.gob.es/energia/es-ES/Novedades/Documents/PAAEE2011_2020.pdf

- [12] Narros F.J. “Simulación energética de un sistema de free-cooling por agua”. Año 2014





Capítulo II

Estado del Arte de las Tecnologías

Índice de contenido

II.1. Principios generales del acondicionamiento radiante.....	61
II.1.1. Historia y antecedentes de los sistemas radiantes actuales	62
II.1.2. Fundamentos de transferencia de calor en sistemas radiantes	65
II.1.3. Confort térmico y sistemas radiantes	70
II.1.4. Ventajas e inconvenientes	71
II.2. Sistemas radiantes. Tipologías.....	73
II.2.1. Sistemas de paneles radiantes.....	77
II.2.2. Sistemas superficiales embebidos	81
II.2.3. Elementos estructurales activados TABS.....	83
II.3. Integración con alternativas de bajo consumo.....	91
II.3.1. Producción de agua fría en torres de enfriamiento.....	93
II.3.2. Producción de agua caliente en captadores solares.....	94
II.4. Referencias.....	95



Índice de Figuras

Figura II.1. Ejemplo de los primeros sistemas de calefacción radiante: ondol originario de Corea [2, Bean et al, 2010]	62
Figura II.2. Ejemplo de los primeros sistemas de calefacción radiante: hipocausto romano [Vallejo D., Arqueología romana en Hispania]	62
Figura II.3. Ejemplo de calefacción radiante: gloria castellana [3, Prieto N., 2015]	63
Figura II.4. Procesos de transmisión de calor en un techo radiante [1, Andrés M., 2015].	66
Figura II.5. Ejemplo de panel radiante IR3000 [5, Babiak et al, 2009]	73
Figura II.6. Tipologías de Sistemas Superficiales Embebidos según su posición [5, Babiak et al, 2009].	74
Figura II.7. Esquema de suelo radiante con tuberías [11, Solartel, 2015]	74
Figura II.8. Ejemplo de Elemento estructurales activados [12, Mauersberger F, 2012] ...	75
Figura II.9. Unión tubo-panel en distintos diseños [13, ASHRAE, 2000]	77
Figura II.10. Distintos diseños comerciales de paneles radiantes (a)- [9, Frico, 2014] y (b)- [14, Uponor, 2014]	78
Figura II.11. Prototipos de diseño de panel radiante aleteado [15, Zhang et al, 2013]....	78
Figura II.12. Esquema de un sistema integrado DOAS/Sistema Radiante [16, Healthy Heating, 2012]	80
Figura II.13. Sistemas superficiales embebidos sobre suelos de madera [10, CEN, 2005]	81
Figura II.14. Ejemplos de disposición de TABS según el tipo de forjado [18, Maarten, 2012]	83
Figura II.15. Ciclo diario típico de un sistema TABS [17, Lehmann et al, 2007].	84
Figura II.16. Máxima carga de calor admisible en el espacio interior (a) y potencia media requerida en el sistema de generación (b) con el uso de un sistema TABS concreto [17, Lehmann et al, 2007].....	86
Figura II.17. Esquema cualitativo de la reducción de cargas puntas con el uso de TABS [21, Rijkssen et al, 2010]	87
Figura II.18. Esquema hidráulico para dos zonas térmicas con distribución a 3 tubos y separación de retornos [24, Lehmann et al, 2011].	90
Figura II.19. Esquema de una torre destinada a la refrigeración de un proceso [25, SGSAS, 2003]	93
Figura II.20. Instalación de producción de agua caliente [26, Roldán J., 2011]	94



II.1. Principios generales del acondicionamiento radiante

Dentro de la situación descrita en el anterior capítulo sobre el contexto energético actual, la problemática en la edificación y las posibles medidas de mejora en la búsqueda de un desarrollo sostenible, se van a plantear los sistemas de acondicionamiento radiante de ambientes interiores como una opción con alto potencial. Para empezar el desarrollo de este capítulo va a ser necesario establecer un conocimiento del estado del arte de las tecnologías, que actúe como base de conocimiento para el desarrollo de este trabajo.

Las instalaciones actuales de acondicionamiento por intercambio radiante suelen englobar los sistemas de superficies emisoras de baja temperatura, basados en la circulación de agua fría o caliente a niveles térmicos próximos al del ambiente, así como los sistemas por hilo eléctrico con superficies radiantes a alta temperatura.

En otras ocasiones, para calefacción industrial en naves de gran altura, se puede considerar un sistema de calefacción radiante por el techo, constituido por paneles pintados sobre unas tuberías por las cuales, circula agua sobrecalentada, vapor, otros fluidos o humos procedentes de un proceso de combustión. En este caso, el documento se va a centrar en los descritos en el segundo párrafo [1, Andrés M., 2015].

II.1.1. Historia y antecedentes de los sistemas radiantes actuales

Es habitual pensar que los predecesores de los sistemas radiantes actuales son procedentes del legado cultural de la época Romana. Sin embargo, el concepto original es anterior a esta época y tiene su origen en el siglo XI a.C., en el cual, las culturas orientales de China y Corea utilizaban sistemas con una cierta similitud. Estos sistemas denominados kang, dikang y ondol (Figura II.1), integraban el calor generado en la cocina en el sistema de calefacción. Este proceso se basaba en hacer pasar los humos procedentes de la combustión por zonas de la superficie del suelo. Estos sistemas se han desarrollado progresivamente a lo largo de los siglos hasta conocerlos tal y como son actualmente [2, Bean et al, 2010]

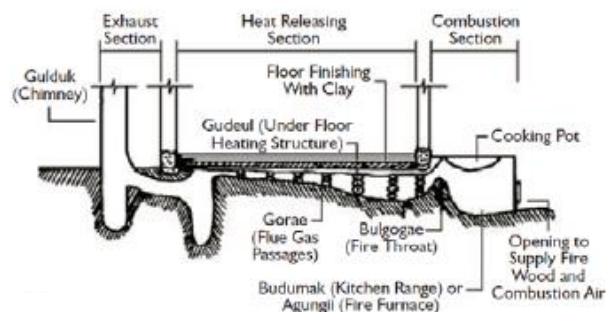


Figura II.1. Ejemplo de los primeros sistemas de calefacción radiante: ondol originario de Corea [2, Bean et al, 2010]

En Europa el primer ejemplo de aplicación de la calefacción radiante ser remonta al siglo III a.C., y se le denomina hipocausto (Figura II.2). Este sistema fue desarrollado por los griegos y heredado por los romanos.



Figura II.2. Ejemplo de los primeros sistemas de calefacción radiante: hipocausto romano [Vallejo D., Arqueología romana en Hispania]

El planteamiento comparte muchas similitudes al ondol coreano, ya que se basa en hacer un hogar o en una zona adyacente destinada a dicho efecto, haciendo discurrir los humos calientes tanto por las paredes de la casa mediante unos canales dispuesto en el interior de estas, como por el suelo mediante una elevación de este para así dejar un espacio inferior. Los humos eran eliminados después de este proceso. Algunas variantes de este sistema se extendieron por Oriente, mientras que en Europa su utilización fue eliminada tras la caída del imperio Romano [2, Bean et al, 2010].

De los pocos sitios donde se tiene constancia de la utilización de métodos similares, es Castilla, donde la conocida como “gloria” (Figura II.3) fue utilizada aproximadamente desde la Edad Media hasta bien entrado el siglo XX, especialmente en zonas rurales.

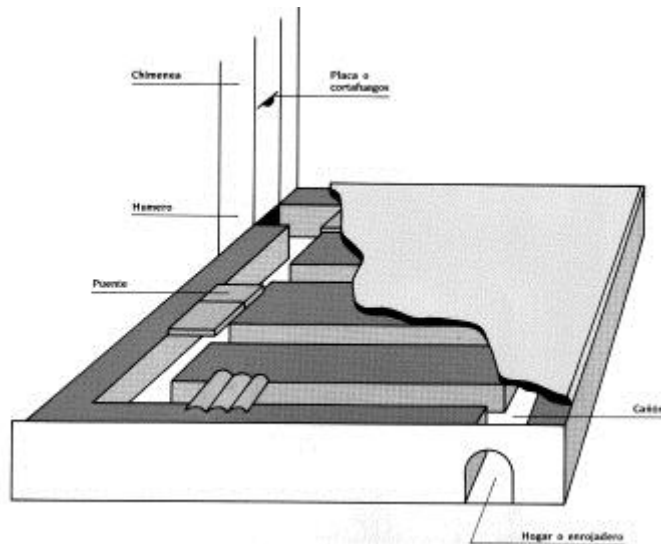


Figura II.3. Ejemplo de calefacción radiante: gloria castellana [3, Prieto N., 2015]

En cualquier caso, el origen de los sistemas de acondicionamiento radiante, ya en su versión moderna, no surgió hasta el siglo XIX. Este tuvo lugar junto con los avances científicos en la transferencia de calor y en la distribución de agua caliente por tuberías. En 1908 todo desembocó en una patente por parte del británico Arthur H. Barker, quien ideó un sistema de calefacción eficiente basado en tuberías embebidas en yeso u hormigón. La patente fue adquirida por la empresa R. Crittal & Company Limited, quien en los años siguientes aplicó este sistema en los techos de un hotel de Liverpool (Inglaterra) y en distintos edificios en Suiza y Alemania. Estos primeros intentos no resultaron muy eficaces debido a problemas de condensaciones y al uso de acero en las tuberías, por lo que la evolución de este sistema quedó temporalmente frenada [2, Bean et al, 2010].



Durante las décadas siguientes, los sistemas por aire fueron usados con mayor preferencia en el acondicionamiento de oficinas. Hacia los años 80, la preocupación creciente el bienestar en ambientes interiores, así como la preocupación por la reducción del consumo de energía, devolvió protagonismo a conceptos de acondicionamiento alternativo como los sistemas radiantes. Para entonces el desarrollo de las tuberías de PEX y la eficiencia en el control de la humedad facilitaron un desarrollo más estable de estos sistemas [4, Kalz, 2009].

Feustel y Stetiu (1995) recogen los diferentes tipos de sistemas radiantes existentes en aquel momento. Asimismo, en esa misma época, Meierhans presenta una de las mayores referencias en el desarrollo de los sistemas TABS (Thermally Activated Buildings Systems). A partir de este momento, algunos casos de estudio han servido para demostrar la aplicación de esta tecnología particular en edificios de oficinas. La mayor aplicación de este tipo de sistemas se ha dado en Centro Europa. A principios de 2001 se estimaban más de 60 edificios con TABS, mientras que en Suiza se estimaba una superficie instalada en torno a los 100.000 m² [4, Kalz, 2009].

Por otro lado, el resto de las tipologías radiantes se han incrementado en el mercado mundial. En este sentido, se estima que el 95% de edificios en el norte de China y el 85% en Corea ya utilizan calefacción por suelo radiante. En Europa y otros países de occidente el crecimiento está siendo muy evidente, no obstante en el caso de Norteamérica, la entrada al mercado de estos sistemas se está produciendo de forma mucho más lenta [2, Bean et al, 2010].



II.1.2. Fundamentos de transferencia de calor en sistemas radiantes

La transferencia de calor, entendida como energía asociada a una diferencia de temperaturas, puede tener lugar a través de tres mecanismos diferentes, como son: conducción, convección y radiación:

- **Conducción:** Mecanismo de transferencia en el que se produce por el intercambio de energía interna entre varios cuerpos, mediante el intercambio de energía cinética del movimiento de las partículas que se encuentran en contacto directo.
- **Convección:** Mecanismo de transferencia de calor entre una superficie y un fluido en movimiento a diferentes temperaturas. Se produce en el seno del fluido cuando varias partes de este se mezclan entre sí a causa de los movimientos de su masa, ya sean forzados (Convección forzada) o como consecuencia de una diferencia de densidades (Convección natural). Hay que puntualizar que la transmisión real de energía entre partículas sigue dándose por conducción, solo que la energía puede transportarse de un punto a otro por el desplazamiento del fluido.
- **Radiación térmica:** Mecanismo de transferencia que hace referencia al intercambio de calor debido a la radiación electromagnética emitida por la superficie de cualquier cuerpo excitado térmicamente, es decir, con una temperatura superior a los 0K.

En general, todos estos modos de transmisión están presentes en cualquier sistema de transmisión de calor que se pretenda analizar, sin embargo, es habitual que uno de ellos sea tan dominante que permita despreciar los efectos de los otros (Figura II.4).

En el caso de los sistemas HVAC convencionales, se vienen empleando instalaciones por aire o unidades cuya cesión de energía se da mayoritariamente por conducción. Aunque en los últimos años se ha retomado el interés por soluciones de acondicionamiento radiante basadas en la disposición de grandes superficies radiantes que intercambian energía con el ambiente interior. El concepto de aprovechamiento de la radiación mediante estos sistemas conlleva una serie de ventajas en cuanto a energía y confort [1, Andrés M., 2015].

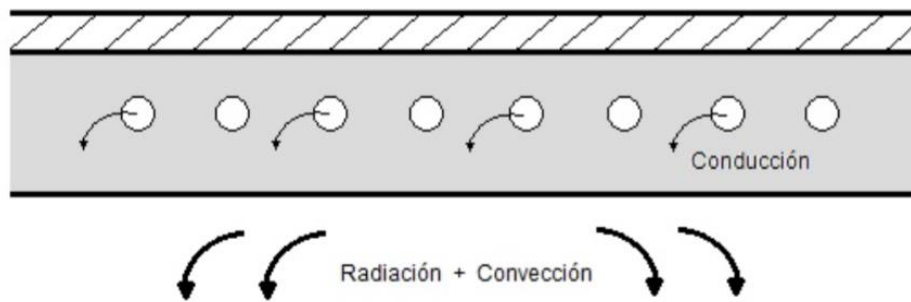


Figura II.4. Procesos de transmisión de calor en un techo radiante [1, Andrés M., 2015].

Como en los sistemas tradicionales, parte del calor es transferido y retirado directamente del aire a través de fenómenos convectivos. La interacción energética entre superficie o fluido se suele dar por convección libre, debido al movimiento generado únicamente por la diferencia de densidades en espacios con velocidades de aire bajas. La convección forzada podría ponerse de manifiesto, aunque de forma más excepcional, en situaciones de mayores velocidades provocadas por un agente externo. En cualquier caso, el flujo de calor va a estar determinado por la “Ley de enfriamiento de Newton” (Eq. II.1):

$$Q_c = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (\text{Eq. II.1})$$

Siendo:

Q_c Flujo de calor (W)

h_c Conductividad térmica del material ($W/m^2 \cdot K$)

A Superficie de intercambio (m^2)

T_s Temperatura de la superficie (K)

T_∞ Temperatura del fluido sin perturbar (K)

El principal problema reside en determinar el valor del coeficiente convectivo h_c en las distintas condiciones de operación de la superficie radiante.

A diferencia de los que ocurre con la mayoría de soluciones convencionales, en este caso, el calor intercambiado en forma de energía radiante con el resto de superficies del entorno supone un porcentaje muy



alto del total. Este fenómeno de radiación térmica está asociado a la intensidad con que la materia emite energía como resultado de su temperatura, siendo el único mecanismo que puede darse sin necesidad de un medio natural. Por tanto dos cuerpos situados en el vacío pueden intercambiarse calor mutuamente como resultado del balance neto de energía entre lo que emiten y reciben de radiación electromagnética.

Cabe mencionar que existen medios capaces de captar parte de la radiación que los atraviesa (Medios absorbentes) como el caso del CO₂ y el H₂O, y otros que son transparentes a la radiación como el caso del aire (Medios no participativos). En consecuencia, en aplicaciones de acondicionamiento radiante de ambientes interiores, la temperatura del aire interior no se ve afectada por la radiación de la superficie en cuestión, sino que esta radiación es absorbida por el resto de superficies del entorno, que posteriormente varían la temperatura del aire de forma indirecta [5, Babiak et al, 2009].

La ley básica por la que se rige la transmisión de calor por radiación es la “Ley de Stefan-Boltzmann” (Eq. II.2), la cual puede ser deducida a partir de las leyes de la termodinámica y afirma que el intercambio de temperatura emitida por un cuerpo por radiación es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

$$e_g = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{Eq. II.2})$$

Siendo:

e_g Flujo de calor (W)

ε Emisividad ($0 < \varepsilon < 1$)

σ Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T_s Temperatura de la superficie (K)

La emisividad de un cuerpo real entendida como la proporción entre la radiación emitida por este y la que emitiría un cuerpo negro a su misma temperatura, varía con la longitud de onda. Se suele asumir un modelo de cuerpo gris de emisividad constante, para así poder generalizar la ley de Stefan-Boltzmann para todos los cuerpos. En el caso de acabados superficiales de materiales de construcción, como puede ser el hormigón, se alcanzan valores de hasta 0,9 para longitudes de onda larga involucradas en el principal intercambio calorífico de los sistemas aquí tratados. Este rango



apenas se encuentra influenciado por el color de las superficies, las cuales tienen una gran incidencia en la emisividad de onda corta [5, Babiak et al, 2009].

En definitiva, en el acondicionamiento radiante se dan dos mecanismos de transferencia de calor fundamentales: radiación y convección. Por otro lado la transferencia de calor por conducción no interviene directamente en la interacción entre la superficie del sistema y su entorno, sin embargo su relevancia es importante en los medios sólidos, siendo clave en la transferencia de calor desde el medio caloportador hasta la superficie emisora del sistema radiante. La ley básica que gobierna la conducción de calor es la “Ley de Fourier” (Eq. II.3), la cual muestra la relación entre el flujo de calor y el campo de temperaturas en el medio material en función de sus propiedades:

$$Q_{cond} = -k \cdot A_{tr} \cdot \nabla T \quad (Eq. II.3)$$

Siendo:

- Q_{cond} Flujo de calor transferido (W)
- k Conductividad térmica ($W/m^2 \cdot K$)
- A_{tr} Área de la superficie de transmisión (m^2)
- ∇T Gradiente de Temperatura (K)

A partir de esta ley, y mediante los correspondientes balances de energía, es posible derivar una ecuación general básica para el análisis de cualquier problema de conducción de calor. La expresión (Eq. II.4), para las 3 coordenadas espaciales es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (Eq. II.4)$$

Siendo:

- T Temperatura (K)
- k Conductividad térmica ($W/m^2 \cdot K$)
- x, y, z Coordenadas espaciales
- ρ Densidad del material (Kg/m^3)



C_p Calor específico ($J/Kg \cdot K$)

t Tiempo (s)

g Generación de energía dentro del sólido

El término del lado derecho de la igualdad representa la cantidad de calor acumulada en el sólido, o lo que es lo mismo, es el que tiene en cuenta los efectos transitorios. Como ya se ha mencionado antes, g es la generación de calor por conducción. Por último los tres primeros sumandos representan la tasa neta de calor por conducción en las tres direcciones del espacio. En función de cada problema esta ecuación puede ser particularizada y simplificada según convenga para facilitar la resolución de problemas [1, Andrés M., 2015].



II.1.3. Confort térmico y sistemas radiantes

El tratamiento del confort térmico solía residir en el control de la temperatura del aire, sin embargo, con eso no basta ya que existen otros muchos factores influyentes en la calidad del ambiente térmico y que han de ser tenidos en cuenta en el diseño de los sistemas de acondicionamiento.

Uno de estos factores se corresponde con la temperatura media radiante del entorno T_{mr} en este caso es necesario tener en cuenta que los ocupantes de ambientes interiores intercambian calor con por convección con el aire y por radiación con todas la superficies a su alrededor. Esto supone un balance de calor para cada ocupante que va a influir notablemente en la percepción térmica de cada uno de los individuos.

En concreto un cuerpo humano, situado en un ambiente con una temperatura en el intervalo de 20 a 28°C, intercambia de forma aproximada un 30% de calor por convección, un 45% por radiación y un 25% por transpiración evaporativa. En este contexto, los HVAC buscan un control de la temperatura del aire favoreciendo un exceso de fracción convectiva, mientras que los sistemas radiantes abordan el control de la temperatura superficial, regulando así la proporción relativa a la temperatura media radiante. En resumen, variando la temperatura de las grandes superficies se logra aumentar la eficacia de los intercambios entre el cuerpo y el entorno, lo cual favorece una percepción térmica confortable [6, Rey y Velasco, 2008].

Los niveles de confort térmico proporcionados por estos sistemas son superiores a los obtenidos mediante sistemas tradicionales. En concreto, en aplicaciones radiantes, la velocidad del aire no supera el metro por segundo, minimizando así el riesgo de incomodidad por corrientes de aire, y el arrastre de partículas de polvo a la zona ocupada. Además la distribución de temperaturas obtenidas es mucho más uniforme en el espacio y las variaciones radiantes generadas por zonas con ventanales pueden ser compensadas con un aumento de la densidad de tuberías en zonas perimetrales [1, Andrés M., 2015].



II.1.4. Ventajas e inconvenientes

En este apartado se van a desarrollar comentarios adicionales relativos a las ventajas y desventajas del acondicionamiento mediante el uso de superficies radiantes, más allá de los procesos fundamentales de transferencia de calor y la garantía de un adecuado confort térmico.

Para empezar, los beneficios de estos sistemas en términos de eficiencia y sostenibilidad en el uso de la energía son muy amplios. El ahorro principal de la energía que produce un sistema radiante en comparación con otros sistemas que usan el mismo tipo de energía se debe a dos aspectos fundamentales.

En primer lugar, a que el uso de agua como fluido caloportador reduce notablemente el consumo asociado al transporte y distribución de la energía. En segundo lugar, las amplias áreas de intercambio dispuestas permiten el trabajo con diferencias de temperatura menores, y por tanto, con niveles térmicos más próximos a los del ambiente. La distribución de agua a estos niveles hace que la generación de energía sea mucho más eficiente e incluso que se pueda plantear el aprovechamiento de recursos alternativos, que de otro modo, no serían aplicables como pueden ser: energía geotérmica, energía del aire ambiente, energías residuales... En este aspecto, se trata de una tecnología englobada dentro de un concepto más general constituido por los sistemas de baja energía o Low-Ex. Estos sistemas hacen un uso más racional de la energía al aprovechar flujos energéticos de baja calidad asociados a la obtención y posterior utilización de energías de alto nivel energético [8, Ala-Juusela, 2003].

Por otra parte, no pueden entenderse los sistemas radiantes de forma aislada sin tener en cuenta la combinación de estos con los correspondientes sistemas de ventilación. Lo más lógico es el acoplamiento de pequeños sistemas de ventilación que garanticen los niveles de IAQ y cubran las cargas latentes (y en algunos casos también las sensibles) del espacio a acondicionar, con sistemas radiantes que se ocupen de la totalidad de las cargas sensibles. Existen numerosos estudios dedicados a este funcionamiento conjunto [7, Causone et al, 2010].

De este modo, la posibilidad de separar la ventilación y el acondicionamiento sensible a través de sistemas radiantes supone ventajas adicionales de interés en el ámbito de la salud. Con la minimización de las corrientes de aire, los movimientos de partículas son muy reducidos, mejorando así la calidad del aire interior, y en consecuencia, disminuyendo la probabilidad de contraer afecciones respiratorias. Además, una buena



aplicación de las configuraciones elimina la estratificación vertical de temperaturas, lo cual evita el riesgo de sufrir dolor de cabeza a causa de la acumulación de aire excesivamente caliente en la zona superior de la estancia [6, Rey y Velasco, 2008].

En otros casos, la ausencia en paredes y techos de estos emisores de calor, aumenta el espacio disponible y la estética de la estancia a acondicionar.

En su contra, también han de indicarse ciertos inconvenientes de los sistemas radiantes, estos inconvenientes están fundamentalmente asociados a la posibilidad de fugas, cuya reparación es mucho más costosa que otras alternativas. Por otro lado, el hecho de que las configuraciones habituales sean horizontales pueden plantear problemas de purga de aire o dificultades en el vaciado de la instalación. Por estos motivos se ha de tener especial cuidado tanto en el cálculo de la instalación como en la adecuación del montaje.

Otro aspecto importante que no se debe descuidar en el régimen de refrigeración es el riesgo de aparición de condensaciones por la existencia de superficies demasiado frías. Para este caso, el límite de temperatura superficial viene impuesto por las condiciones del punto de rocío de cada situación, si bien se puede señalar la temperatura de 19°C como valor recomendado de referencia a tener en cuenta de forma general. En cualquier caso, aunque la aplicación de sistemas radiantes de refrigeración en ambientes con contenido de vapor de agua elevados, el problema de las condensaciones puede ser fácilmente controlado por medio de una planificación adecuada de la ventilación y un control exhaustivo de la humedad [10, CEN, 2005].

Finalmente, resulta interesante comentar dos aspectos relacionados con la calidad del ambiente acústico y el nivel de ruido. Por un lado, la aplicación de sistemas radiantes para tratar las cargas sensibles provoca la reducción de las necesidades de caudales de aire de los sistemas HVAC convencionales, pudiendo adaptar las dimensiones de los conductos y las velocidades de los flujos a un mejor control del ruido de la instalación. Sin embargo, la necesidad de disponer de amplias superficies de contacto directo con el ambiente, limita las opciones en cuanto al diseño de elementos de absorción acústica (Alfombras, moquetas, capas absorbentes...). Por tanto se ha de encontrar un equilibrio entre los elementos de absorción y los requisitos de capacidad de disipación [5, Babiak et al, 2009].

II.2. Sistemas radiantes. Tipologías

Como ya se ha avanzado durante este trabajo, los sistemas de acondicionamiento radiante se sirven de la circulación de un fluido calorportador a través de tubos, para intercambiar energía con la superficie emisora de calor. Esta tecnología ha avanzado sobretodo en el centro y el norte de Europa, con una menor implantación en Norteamérica así como en países de climas más cálidos. Esto se suele deber a la limitación de enfriamiento de las superficies emisoras y al riesgo debido a condensaciones. En cualquier caso, estos sistemas son capaces de generar tanto calefacción como refrigeración, utilizando un fluido a niveles térmicos moderados próximos a los del ambiente.

No es posible profundizar en el análisis de estos sistemas sin antes realizar una clasificación de las tipologías existentes. Actualmente existe un criterio de clasificación en base al grado de acoplamiento térmico del sistema con los propios elementos estructurales, así como su tiempo de respuesta y capacidad de acumulación. Por tanto la mayoría de sistemas radiantes responden a tres tipologías fundamentales.

- **Paneles radiantes:** Sistemas situados en el techo, sobre los que se dispone una malla de conductos de agua incorporada en el falso techo o instalada mediante configuraciones colgantes (Figura II.5). Suelen estar formados por superficies metálicas, normalmente de Aluminio o placas de Yeso. En algunos casos se usan como sistemas de apoyo de sistemas embebidos para lograr un comportamiento dinámico más rápido. Como conclusión, se puede decir que son sistemas desacoplados del edificio con una capacidad de acumulación baja y un tiempo de respuesta rápido.



Figura II.5. Ejemplo de panel radiante IR3000 [5, Babiak et al, 2009]

- **Sistemas superficiales embebidos:** Sistemas equipados sobre la estructura del edificio pero desacoplados térmicamente de este mediante una capa de aislamiento (Figura II.7). Existen numerosas variantes en función de la composición de las capas del sistema y la posición de los tubos, dentro de las cuales destacan las tipologías A, B y C (Figura II.6) [10, CEN, 2005]. Las configuraciones más comunes suelen constar de tubos embebidos en una capa niveladora de mortero, o bien colocados directamente sobre el aislante bajo dicha capa.

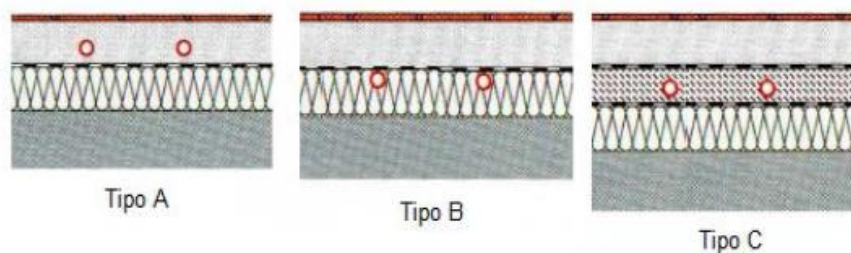


Figura II.6. Tipologías de Sistemas Superficiales Embebidos según su posición [5, Babiak et al, 2009].

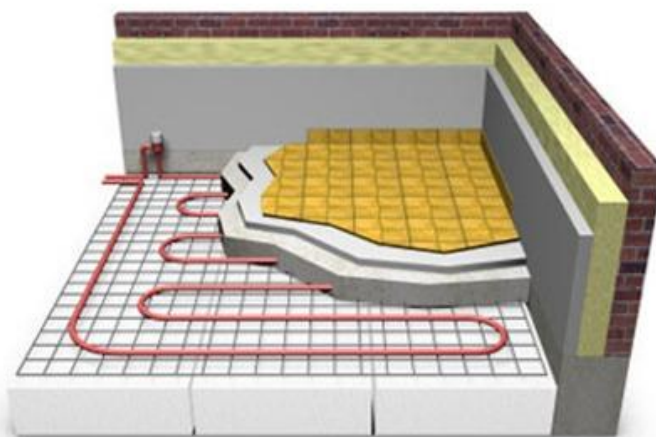


Figura II.7. Esquema de suelo radiante con tuberías [11, Solartel, 2015]

- **Elementos estructurales activados** (En inglés TABS, Thermal Activated Buildings): Estos sistemas están basados en conductos de agua totalmente embebidos en la propia estructura del edificio. Por tanto, se va a producir un fuerte acoplamiento térmico entre sistema y edificio. Empleando la estructura como elemento de almacenamiento térmico, se pueden separar la producción y la demanda energética, esto es debido a las características de este sistema. Esta gran inercia térmica

es aprovechada para reducir los picos en la demanda y optimizar las prestaciones de eficiencia en sistemas de generación. Es necesario especificar que el desarrollo de este trabajo va a tratar sobre la acumulación térmica de materiales como el hormigón, y por tanto el estudio de las TABs va a desempeñar un papel fundamental.

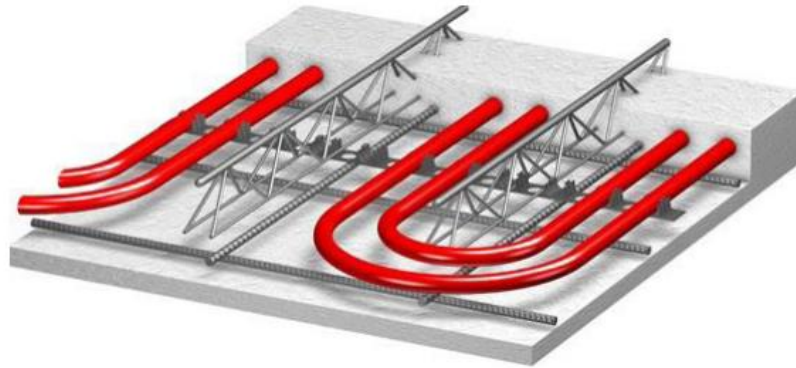


Figura II.8. Ejemplo de Elemento estructurales activados [12, Mauersberger F, 2012]

Una vez explicados los tres casos, la diferencia principal reside en el modo en que se da la transmisión de calor desde el fluido hasta la superficie emisora, y las consecuencias que se derivan de cada caso. En común tienen que la transmisión de calor desde la superficie radiante hasta el ambiente ocupado se produce mayormente por radiación y convección. En resumen, se dispone de una superficie fría o caliente, que en función de su temperatura y las condiciones del entorno, proporciona una determinada capacidad de disipación térmica. Según la norma europea EN15377, es posible considerar una curva característica para determinar la energía transferida desde una superficie radiante, independientemente de la tipología de sistema radiante considerado.

Estas son algunas de las correlaciones (Eq. II.5), más comúnmente utilizadas en función de la temperatura de la superficie radiante y del ambiente:

$$\text{Suelo radiante o techo frío} \quad q = 8,92 \cdot |(T_{op} - T_{s,m})|^{1.1} \quad (\text{Eq. II. 5a})$$

$$\text{Pared caliente o fría} \quad q = 8 \cdot |(T_{op} - T_{s,m})| \quad (\text{Eq. II. 5b})$$

$$\text{Techo caliente} \quad q = 6 \cdot |(T_{op} - T_{s,m})| \quad (\text{Eq. II. 5c})$$

$$\text{Suelo refrescante} \quad q = 7 \cdot |(T_{op} - T_{s,m})| \quad (\text{Eq. II. 5d})$$



Siendo:

T_{op} Temperatura operativa (K)

$T_{s,m}$ Temperatura media de la superficie radiante (K)

q Flujo de calor (W/m^2)

La aplicación de estas expresiones puede emplearse para estimar las limitaciones de la capacidad del sistema en caso a las temperaturas superficiales admisibles (Figura II.9). Así mismo, la curva característica se podrá utilizar en el cálculo de otros parámetros de diseño de los sistemas radiantes.

Tabla II.1. Valores generales comúnmente aceptados en sistemas de acondicionamiento por superficies radiantes [5, Babiak et al, 2009].

	Coeficiente de transferencia combinado (W/m^2K)		Temperaturas superficiales admisibles ($^{\circ}C$)		Máxima capacidad de disipación (W/m^2)	
	Calefacción	Enfriamiento	Máximo (Calefacción)	Mínimo (Enfriamiento)	Calefacción	Enfriamiento
Suelo (Zona suelo)	11	7	29	19	88	42
(Zona perimetral)	11	7	35	19	163	42
Pared	8	8	40	17	160	64
Techo	6	11	27	17	42	88

II.2.1. Sistemas de paneles radiantes.

Estos paneles, se suelen disponer de forma habitual en configuraciones de techo, debido a la mayor disponibilidad de este espacio y las menores exigencias en cuanto a resistencia mecánica. Además constituyen la tipología de sistemas radiantes que más se asemejan a los HVAC convencionales. Como se ha indicado antes, son sistemas relativamente ligeros, desacoplados de la propia estructura del edificio y con una respuesta térmica no muy intensa pero rápida, además hacen aplicables a ellos los principales fundamentos de operación y control [13, ASHRAE, 2000]. Sus posibilidades de cara a la mejora del confort y el uso de energía son un estudio de interés.

Algunos estudios acerca del ahorro energético de esta tecnología demostraron la posibilidad de obtener reducciones aproximadas del 30% en el consumo energético en comparación con sistemas todo-aire convencionales. Además este potencial ha demostrado ser susceptible de ampliación a partir del aprovechamiento de técnicas evaporativas.

En cuanto a los aspectos generales de diseño, Feustel y Stetiu presentaron una evaluación preliminar de la tecnología radiante, abordando aspectos en relación a su diseño y aplicación (Figura II.9). De acuerdo con este desarrollo, en los sistemas de paneles la conexión entre tubos y superficie emisora representa un determinante que ha de reducir la resistencia térmica asociada, de forma que la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido sea la menor posible. Dicha resistencia térmica puede variar notablemente entre diseños y verse afectada por el paso del tiempo por efectos tales como: corrosión, adhesión de suciedad... Por tanto es recomendable determinar su valor en forma experimental o remitirse a los datos certificados por el fabricante.

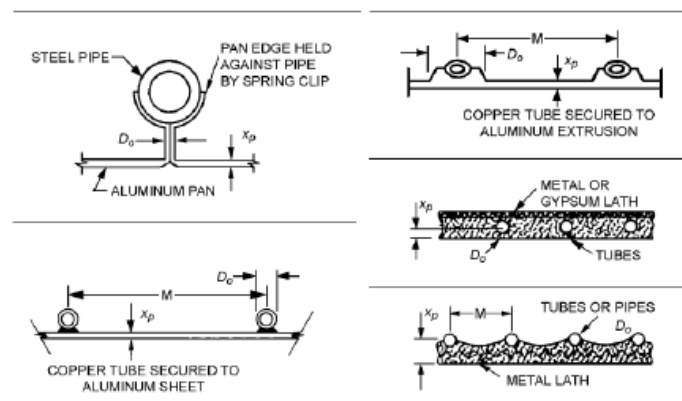


Figura II.9. Unión tubo-panel en distintos diseños [13, ASHRAE, 2000]

Otro punto a tener en cuenta en el diseño de estos sistemas son las pérdidas en calefacción por la parte posterior y los bordes del panel. Por tanto es habitual disponer de suficiente material aislante en estos puntos para mantener un flujo de calor dentro de unos márgenes óptimos. Se ha estimado que el aprovechamiento de la potencia se sitúa en torno a un 93%, donde el 7% restante se pierde hacia la estancia contigua.

En base a estos datos, se contemplan tres soluciones diferentes fundamentales para paneles radiantes. Sin embargo, la variedad de modelos y diseños comerciales (Figura II.10) que existen en la actualidad se han extendido enormemente, abarcando opciones más o menos integradas, con superficies metálicas o en yeso, y adaptados a los requerimientos estéticos de interiores. De todas formas la investigación de este tipo de sistemas se encuentra de actualidad y actualmente se están desarrollando diseños muy innovadores como con aletas (Figura II.11), capaces de proporcionar una capacidad de enfriamiento un 19% superior [13, ASHRAE, 2000].



Figura II.10. Distintos diseños comerciales de paneles radiantes (a)- [9, Frico, 2014] y (b)- [14, Uponor, 2014]

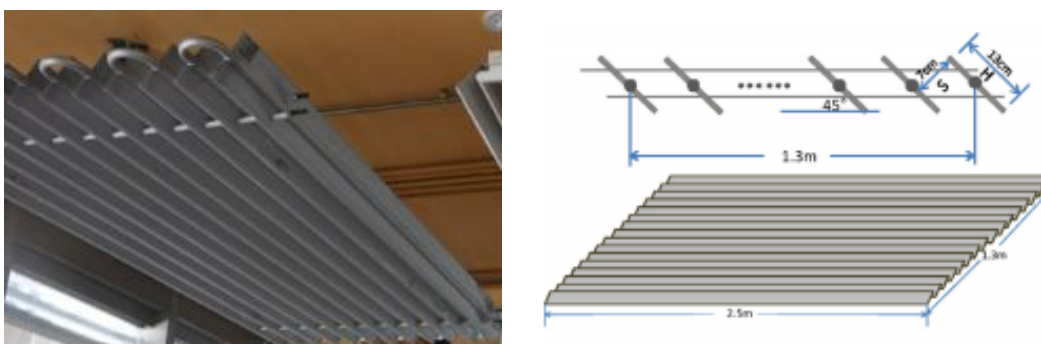


Figura II.11. Prototipos de diseño de panel radiante aleteado [15, Zhang et al, 2013]



Por otro lado, existen recomendaciones [13, ASHRAE, 2000] según las cuales, la integración de los paneles radiantes en la instalación global HVAC se adecúa a conceptos tradicionales, pudiéndose emplear esquemas de 2 o 4 tubos. El diseño de la instalación permite saltos térmicos en torno a 10°C en calefacción y 3°C en refrigeración, y requiere determinar: el tipo de paneles, su superficie, el esquema de interconexión entre ellos, la temperatura del agua de impulsión y el flujo másico. Es importante considerar las condiciones de diseño interiores, y que el estado del aire en contacto directo con los paneles influye directamente en el rendimiento del sistema.

En referencia a la modelización de sistemas de paneles radiantes, a pesar de regirse por unas pautas de dimensionamiento más o menos estándares, la optimización del aprovechamiento de estos, tanto en términos de eficiencia como de confort energético se debe hacer mediante la modelización y simulación de su comportamiento bajo distintos condicionantes. Dicho aspecto es fundamental a la hora de analizar la integración del sistema dentro de la dinámica del edificio y en combinación con otros equipos terminales y de generación, con el fin de evaluar y proponer estrategias de operación óptimas. Es, por este motivo, que en los últimos tiempos, se han dedicado numerosos esfuerzos al desarrollo de este tipo de modelos [1, Andrés M., 2015].

Como ya se ha especificado anteriormente, dentro de la tipología de sistemas de acondicionamiento radiante, los sistemas de paneles han sido asociados con las ya mencionadas limitaciones de capacidad y riesgo de condensaciones, sin embargo hay estudios que afirman que, específicamente para este sistema, tales preocupaciones no han de tenerse en cuenta si se adecúa la aplicación del sistema RCP en combinación con DOAS (Dedicated Outdoor Air System), es decir un sistema dedicado específicamente al tratamiento del aire de ventilación. En este tipo de soluciones el sistema DOAS se ocupa de toda la carga en condiciones de diseño, lo cual, sin embargo, no se garantiza estrictamente en condiciones transitorias extremas. Pese a esto, se puede verificar que, en las situaciones más desfavorables, la posibilidad de aparición de condensaciones significativas es remota. Aun así, se ha de comprobar, mediante un sencillo análisis cuantitativo, utilizando valores de diseño comúnmente aceptados, que se cubre una carga sensible perteneciente al rango de la capacidad de nuestro sistema [1, Andrés M., 2015].

Desde un punto de vista económico (tanto en costes de inversión como en costes de operación), esta solución híbrida sigue resultando más favorable que los sistemas convencionales, más aun teniendo en cuenta el abaratamiento de esta tecnología, conforme su desarrollo se incrementado durante los últimos años. Por otro lado se puede afirmar que una

combinación de paneles radiantes con sistema DOAS es capaz de reducir hasta un 42% el consumo de energía eléctrica anual asociada a un sistema convencional VAV con free cooling. Como conclusión estos sistemas reafirman la importancia de considerar un enfoque integrado DOAS/Sistemas radiantes (Figura II.12), y no pensar en los segundos como soluciones de operación aislada.

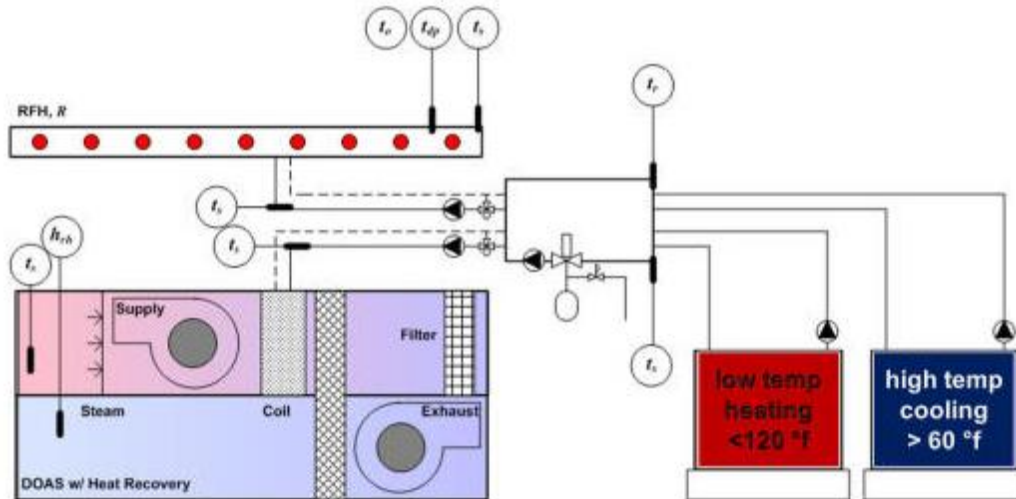


Figura II.12. Esquema de un sistema integrado DOAS/Sistema Radiante [16, Healthy Heating, 2012]

Por último, conviene destacar como punto a favor de los sistemas de paneles radiantes, la alternativa de acondicionamiento sostenible adecuada a estrategias de rehabilitación energética en la edificación. Este aspecto tiene gran interés, dado que los actuales requerimientos de eficiencia energética en el sector deberán ser abordados a través de acciones de renovación sobre los edificios existentes.

II.2.2. Sistemas superficiales embebidos

Este segundo tipo dentro de la tecnología de acondicionamiento radiante suele estar mayoritariamente representado por los sistemas de suelo radiante.

Por un lado, se trata probablemente de la variante más extendida y desarrollada de sistemas radiantes, con una implantación sólida en el mercado europeo desde hace años. Por tanto, su estudio en profundidad carecería de una motivación clara. Por otro lado, su utilización se centra especialmente en aplicaciones de calefacción, lo cual la hace de interés en edificios pertenecientes sobre todo a los climas fríos (con demanda de calefacción dominante), e incluso en el sector residencial en países con climatologías más cálidas (Sur de Europa). En estas últimas áreas geográficas, sin embargo, los edificios de oficinas y comerciales presentan habitualmente un claro predominio de la demanda de refrigeración a lo largo de todo el año, constituyendo aún los sistemas HVAC por aire la solución de referencia. Por esta razón, es en este ámbito particular donde la adaptación y el aprovechamiento de los beneficios de los sistemas radiantes suponen un verdadero reto aún por abordar, siendo los paneles y los TABS las opciones más atractivas para ello.

Con el fin de presentar unos contenidos del capítulo más completos y coherentes, se van a incluir a continuación una breve referencia a la información disponible relativa a aspectos específicos de diseño y aplicación. En este apartado se van a describir con mayor detalle la composición de las posibles variantes existentes dentro de esta tipología, tanto asociadas a las construcciones habituales de hormigón como a aquellas de madera quizá menos habituales (Figura II.13).

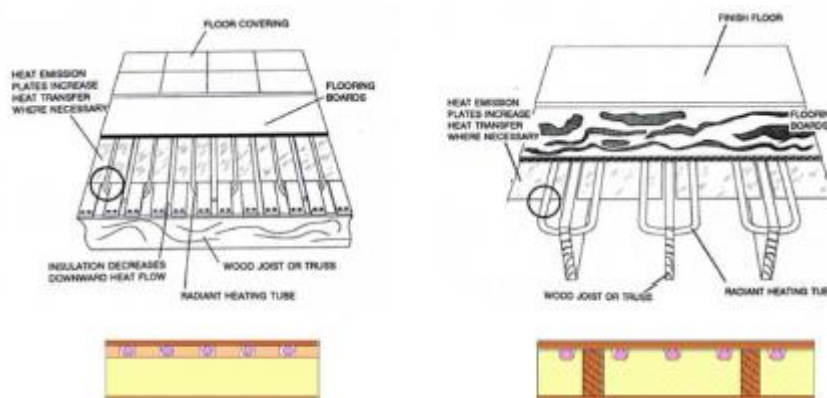


Figura II.13. Sistemas superficiales embebidos sobre suelos de madera [10, CEN, 2005]



De acuerdo a los criterios de [10, CEN, 2005], el diseño de tales sistemas ha de fundamentarse en la estimación de la capacidad de calefacción o refrigeración del mismo, para lo cual se plantean dos alternativas. Por un lado, existe un procedimiento estándar, detallado en la norma CEN 2008 EN 1264, basado en la estimación de la transferencia de calor a través de una función potencial que tiene en consideración los distintos parámetros geométricos y constructivos del sistema particular. Esta metodología es aplicable solamente para las variantes Tipo A-D.

Por otra parte, la segunda alternativa consiste en el establecimiento de una red equivalente de resistencias entre los niveles térmicos del fluido y el entorno, capaz de representar de forma adecuada la transferencia de calor a través del sistema. Este enfoque es requerido para el cálculo de sistemas superficiales embebidos en estructuras de madera (Tipo G) y es apto también para el análisis de sistemas TABS, tal como se detallará en futuros apartados de este trabajo.

II.2.3. Elementos estructurales activados TABS

La tercera de las tipologías de acondicionamiento radiante mencionadas hace alusión a los sistemas basados en elementos estructurales activados. Se trata de un concepto al que diversos autores se han referido con distintas denominaciones, si bien, quizá TABS (Thermally Activated Buildings System) sea el término más extendido y el que consecuentemente será empleado en el desarrollo de este trabajo [17, Lehmann et al, 2007].

Tal como ya se ha mencionado previamente, los sistemas TABS consisten en una malla de tubo embebida en el hormigón estructural (cuyo comportamiento va a ser el principal tema a tratar durante este trabajo) del propio edificio, a través de la cual circula un fluido calo-portador que absorbe o cede energía. Dados los distintos diseños de losas de hormigón existentes, es posible considerar distintas disposiciones de TABS asociadas a cada uno de ellos (Figura II.14). No obstante, salvo que se especifique lo contrario, cualquier análisis general de estos sistemas hace referencia al comportamiento con losas macizas, ya que se simplificarían los cálculos de forma importante.

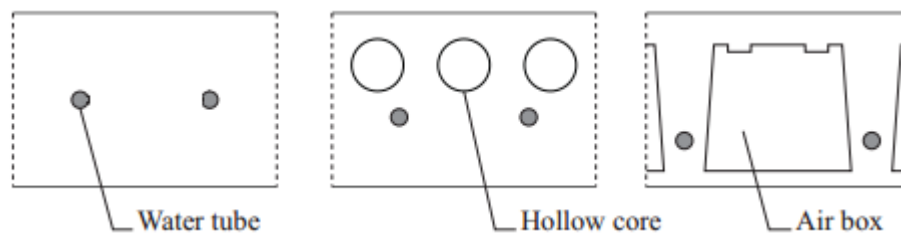


Figura II.14. Ejemplos de disposición de TABS según el tipo de forjado [18, Maarten, 2012]

El concepto TABS integra simultáneamente el desempeño de dos funciones diferenciadas dentro del edificio. Por un lado forma parte de los propios elementos estructurales proporcionando la resistencia y rigidez necesarias para la sustentación del edificio, mientras que por otro, gracias a la activación térmica a través de los tubos embebidos, actúa como un sistema HVAC más. De acuerdo con ello, se establece un fuerte acoplamiento térmico entre la superficie emisora y la estructura, que es obligada a ser contemplada dentro de la estrategia energética global del edificio. Además, este se convierte en un gran almacén de energía y el sistema TABS es dotado de un comportamiento dinámico con una inercia muy superior a la de otras tipologías radiantes descritas hasta ahora. Todo esto, constituye la principal

característica diferenciadora de este sistema, cuyas implicaciones en su diseño y en sus posibilidades de aprovechamiento requieren cuidar aspectos que en cierto modo han podido ser ignorados tradicionalmente.

En cuanto a los Fundamentos de diseño y aplicación, cabe indicar que los sistemas TABS pueden ser empleados tanto para calefacción como para refrigeración, dispuestos típicamente en techos o suelos de edificios del sector secundario. Si bien, la implementación actual de medidas para la reducción de la demanda energética a través de actuaciones en la envolvente, diseño pasivo... y los perfiles de alta carga interna de tales edificios, hacen que estos tengan habitualmente necesidades de refrigeración a lo largo de todo el año. Por tanto, de forma genérica la consideración del sistema TABS es comúnmente asociada a sistemas de enfriamiento a través de techos.

Así, en un ciclo de operación diario típico (Figura II.15), el sistema TABS se carga durante el día como consecuencia de la combinación de las solicitaciones internas y externas, produciéndose un aumento en la temperatura de la estructura. Al finalizar el horario de uso del edificio, comienza el periodo de descarga del sistema evacuando el calor hacia el agua que se hace circular por los tubos embebidos. De esta forma, la losa se enfría hasta la temperatura adecuada para reiniciar el ciclo al día siguiente.

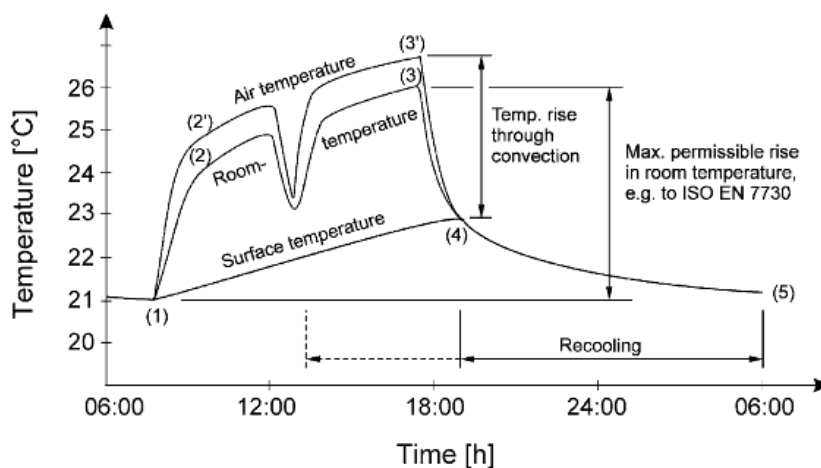


Figura II.15. Ciclo diario típico de un sistema TABS [17, Lehmann et al, 2007].

De acuerdo con este proceso, la temperatura del aire interior no se mantiene fija en una determinada consigna como ocurre en sistemas convencionales, sino que también experimenta una evolución creciente a lo largo del día a un ritmo en torno a 0.5 y 1 K/h. Si no ocurriese así, la capacidad de acumulación del sistema sería desaprovechada. No obstante,



oscilaciones de la temperatura de hasta 4 K/h se consideran aceptables siempre que sucedan dentro de la zona de confort. [19, Kolarik, 2011]

A la vista de este funcionamiento, a la hora de diseñar un sistema TABS es necesario conocer si la capacidad del mismo para una temperatura del agua dada, permite mantener la temperatura del ambiente interior dentro del intervalo de confort térmico durante el horario de ocupación. Cabe destacar en este sentido, que el propio sistema demuestra un efecto de autorregulación incrementando la potencia disipada cuando la temperatura del aire interior tiende a subir en momentos de mayor demanda. En cualquier caso, para conseguir que este efecto sea suficiente para evitar exceder los límites de confort, se deben manejar diversos aspectos determinantes como la capacidad de acumulación del sistema (Unos de los principales temas a tratar en este trabajo), su máxima potencia de disipación, así como el periodo de funcionamiento y la máxima carga asociados a los sistemas de producción. Asimismo, algunos de los principales parámetros de diseño que han de calcularse son la temperatura del agua, el flujo másico, el paso de tubo del circuito embebido y su posición en la losa, los tiempos de operación necesarios para la descarga de la losa... [20, Koschenz et al, 1999].

De acuerdo con los principios de operación descritos anteriormente [17, Lehmann et al, 2007], se ha planteado un detallado estudio de simulación para dar respuesta a algunas de las consideraciones de diseño mencionadas. A través de sus resultados (Figura II.16), concluyeron que en un sistema TABS los procesos de transferencia entre la superficie y el aire apenas se encuentran afectados por la transferencia de calor desde el agua a la losa. Por lo tanto, la máxima carga de calor que puede manejar el sistema (cargas internas y cargas solares conjuntamente) es prácticamente independiente de la estrategia escogida para realizar la descarga térmica de la losa. En realidad, esta depende fundamentalmente de la máxima variación admisible en la temperatura del aire a lo largo del día.

En cualquier caso, pese a la utilidad de estas directrices generales, así como de los métodos de dimensionado simplificados descritos, cualquier proceso de diseño detallado de un sistema TABS debe recurrir a la estimación dinámica de su capacidad de disipación a través de: métodos de diferencias finitas (FDM), elementos finitos (MEF) o de modelos adaptados para la simulación dinámica de edificios.

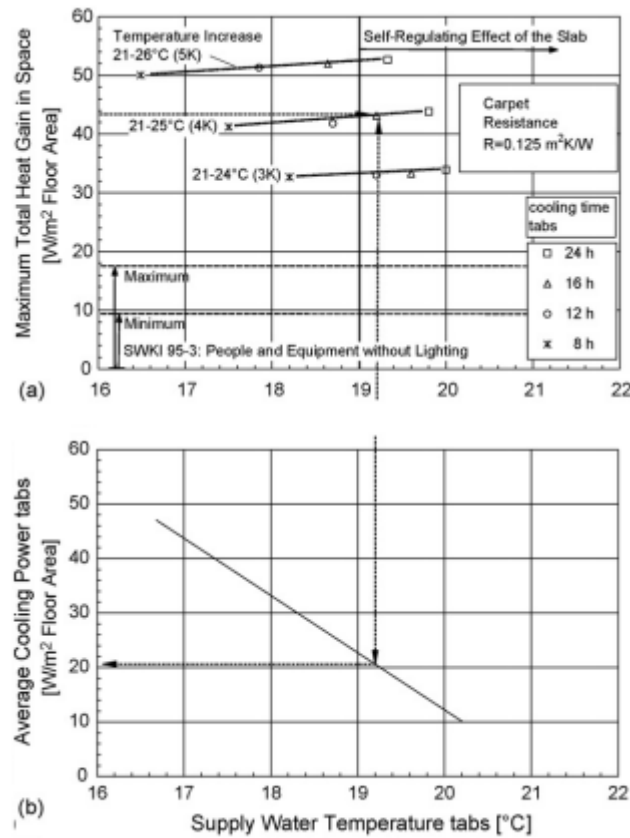


Figura II.16. Máxima carga de calor admisible en el espacio interior (a) y potencia media requerida en el sistema de generación (b) con el uso de un sistema TABS concreto [17, Lehmann et al, 2007].

Por otra parte, como se ha visto, la gran inercia térmica del sistema TABS plantea una deslocalización de la demanda de energía. Esto posibilita cubrir las necesidades de los espacios interiores con una producción más uniforme prolongada en periodos más largos que los estrictamente asociados a dicha demanda (Figura II.17). Por tanto, se reducen las cargas punta del sistema, lo cual favorece el dimensionado de equipos de generación más pequeños y el establecimiento de contratos eléctricos más favorables (con un menor término de potencia, así como un aprovechamiento de precios más bajos por la operación en horarios 'valle', en los que la eficiencia de los equipos generadores es también mayor). En resumen, la reducción de los picos de demanda supone un importante ahorro de costes [21, Rijksen et al, 2010].

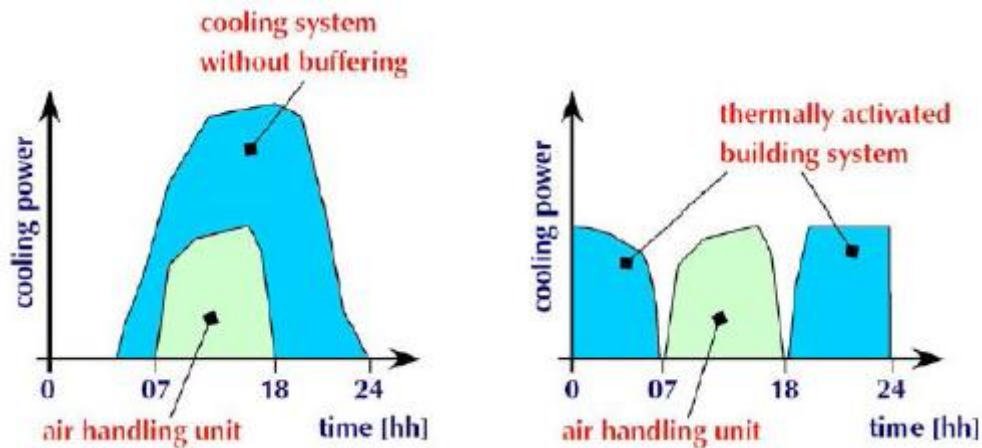


Figura II.17. Esquema cualitativo de la reducción de cargas puntas con el uso de TABS [21, Rijkssen et al, 2010]

Hay que tener en cuenta que, aparte de las ventajas derivadas de la particular dinámica del sistema, esta implica mayores dificultades a la hora de establecer estrategias de control [22, Gwerder et al, 2009]. La respuesta lenta del TABS ante posibles acciones de control (modificación de la temperatura del agua, cierre de válvulas, etc.) conlleva un riesgo de que se den periodos transitorios con calentamientos o enfriamientos excesivos o se produzcan alternancias de inyección y extracción de energía de la losa de forma ineficiente. Además, mantener los niveles de confort en estancias con distintos perfiles de carga asociadas a una misma zona hidráulica puede resultar especialmente complejo con este tipo de sistemas.

El control de sistemas de acondicionamiento radiante se ha llevado a cabo tradicionalmente a través de la acción coordinada de dos mecanismos diferentes. Por un lado, se establece un control central ocupado de definir la temperatura de impulsión del agua en función del clima exterior teniendo en cuenta ciertas características del edificio; y por otra parte, se dispone un control individual on-off que permite o impide la circulación de agua por el sistema en base a una consigna de temperatura para cada estancia [22, Gwerder et al, 2009].

Sin embargo, dadas las particularidades del sistema TABS, el control individual de esta tipología no resulta tan efectivo, por lo que generalmente se ha recomendado definir únicamente controles centrales de la temperatura de impulsión agrupando las distintas estancias según una adecuada zonificación del edificio (de acuerdo por ejemplo a orientaciones, perfiles de uso, etc.) [5, Babiak et al, 2009]. En este sentido, algunos estudios han analizado la utilización de distintas opciones para el control de la temperatura del agua. Además, cabe señalar que en este enfoque comúnmente utilizado, la elección



entre los modos de calefacción o refrigeración se realiza en base a criterios estacionales o de temperatura externa, y normalmente no se emplea ninguna variable de zona como 'feedback', asumiendo que la auto-regulación del TABS mantendrá los niveles requeridos de confort [22, Gwerder et al, 2009].

En general, la aplicación de esta estrategia convencional permite controlar la operación del sistema TABS para mantener unas condiciones de confort adecuadas [23, Sourbron, 2012]. Sin embargo, conlleva una serie de desventajas asociadas fundamentalmente a las diferencias en las funciones de control para cada modo de operación (calor o frío), la escasa automatización del cambio de uno a otro, y los consumos de energía innecesarios debidos a la operación de los equipos de bombeo.

En este contexto, investigadores de los laboratorios EMPA, (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) y del grupo de tecnologías para la edificación de la empresa Siemens, en Suiza, han presentado recientemente un concepto que constituye una referencia en el ámbito del control de sistemas TABS. El método planteado, denominado UBB (Unknown-But-Bounded), se fundamenta en una estrategia de control base de impulsión continua de agua a un nivel térmico que es función de la temperatura exterior. Si bien, tiene en cuenta las características del edificio, las consignas de confort térmico, y especialmente, los perfiles de las ganancias de calor (internas y solares), que pese a ser desconocidos y variables, habitualmente pueden ser acotados entre unos límites superior e inferior. Este procedimiento, que se sirve de la modelización del sistema y el estudio de su respuesta dinámica es descrito en detalle. Su aplicación permite determinar las curvas de calefacción y refrigeración, y establecer un criterio para la operación automática del sistema TABS a lo largo del año, garantizando los requisitos de confort.

En el mismo sentido, también se ha analizado [22, Gwerder et al, 2009] la utilización de la modulación de la amplitud de pulsos (*Pulse Width Modulation*, PWM) de cara a mejorar la eficiencia energética del TABS y de su concepto de control. En base a ello, la circulación de agua ya no es continua, sino que se produce de forma intermitente inyectando o extrayendo energía de la losa solamente durante una parte del ciclo de operación considerado. Nótese que la ya comentada operación eficiente de TABS con un traslado de la producción de energía a periodos nocturnos fuera de las horas de demanda, no es más que un caso particular de aplicación del concepto PWM en un periodo de 24 horas. Bajo operación PWM, la temperatura de impulsión del agua debe ser más elevada en calefacción y más baja en refrigeración para poder compensar los periodos en que no hay circulación de fluido. De esta forma, para una temperatura dada, el tiempo durante el cual las bombas



deben estar accionadas se puede calcular conforme a los correspondientes balances de energía.

En cualquier caso, otras alternativas más simples, que corrigen igualmente algunas de las carencias de la opción convencional, también han demostrado proporcionar resultados interesantes. Es el caso del enfoque empleado por Sourbron y Helsén (2010) para analizar distintos aspectos del comportamiento del sistema TABS controlado mediante una sencilla estrategia on-off con 'feedback' (o retroalimentada) y temperatura de impulsión constante. A través de él, destacaron la importancia de que la variable de realimentación del controlador sea una magnitud medible en cualesquiera condiciones de operación y que su medición esté afectada lo menor posible por la posición del sensor. En este sentido, la temperatura superficial del TABS se muestra como la elección óptima. Asimismo, su estudio aporta un valioso análisis de cara a la selección de los niveles térmicos de impulsión y las consignas de la variable controlada, y demuestra el efecto positivo de establecer un setback nocturno en dichas consignas, así como de utilizar el apoyo de la temperatura de la ventilación para controlar el confort en las primeras horas de la mañana.

Por último, cabe reseñar un reciente incremento en la aplicación en el ámbito de la edificación de estrategias de control predictivo on-line apoyadas en modelos matemáticos (*Model Predictive Control*, MPC). A través de ellas es posible anticipar las acciones de control necesarias como respuesta a la predicción de futuras solicitudes que afecten al edificio, tales como condiciones climatológicas o patrones de ocupación, iluminación, etc. Sin embargo, esto requiere un importante esfuerzo de modelado matemático y capacidad de cálculo para poder estimar en tiempo real cómo se va a comportar el edificio en el siguiente horizonte temporal considerado. Adicionalmente, la implementación de estos esquemas de control requiere tener en consideración otros aspectos no menos importantes relativos al tratamiento de datos, protocolos de comunicación entre el controlador y el edificio, servicios de predicción, algoritmos de optimización, etc. En particular, se pueden encontrar diversas referencias MPC aplicadas al control de sistemas TABS [23, Sourbron, 2012].

Otras posibles consideraciones acerca de los TABS podrían ser las distribuciones de este sistema en las edificaciones. Normalmente, en un edificio pueden considerarse al menos dos zonas diferenciadas en base a las características de las solicitudes internas y externas, así como de los requerimientos de confort térmico de las distintas estancias. Según esto, el manejo de la elevada inercia térmica del sistema TABS de cara a hacer posible un funcionamiento eficiente de la instalación satisfaciendo simultáneamente las diferentes necesidades energéticas de tales zonas, no

depende solamente de la capacidad de plantear estrategias de control adecuadas. Estas solo serán efectivas si están acompañadas de un cuidado diseño del esquema hidráulico.

En este sentido, se ha propuesto un esquema con tres tuberías de distribución y retornos de zona separados como una opción muy interesante (Figura II.18). Por un lado, se establece una solución de compromiso intermedia entre las limitaciones de flexibilidad de la distribución a dos tubos y el excesivo coste de la instalación a cuatro tubos. Por otro, se limita la interacción térmica entre ambas zonas. En concreto, este esquema permite trabajar con distintas consignas de impulsión en cada zona del edificio dentro de un mismo modo de operación (frío o calor), sin dar lugar a pérdidas indeseadas por mezcla del retorno. Esto, a su vez, facilita garantizar los requisitos de confort térmico y hace que los costes de inversión adicionales sobre una alternativa con retorno común resulten despreciables, teniendo en cuenta los ahorros energéticos alcanzables de aproximadamente el 20-30% [24, Lehmann et al, 2011].

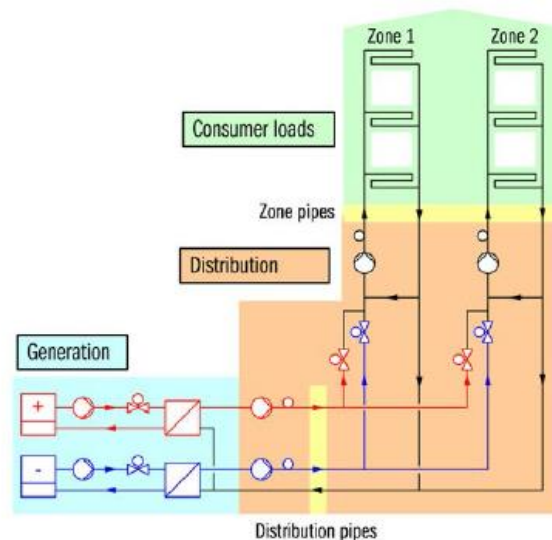


Figura II.18. Esquema hidráulico para dos zonas térmicas con distribución a 3 tubos y separación de retornos [24, Lehmann et al, 2011].



II.3. Integración con alternativas de bajo consumo

Tal como se avanzó anteriormente, la utilización de sistemas de acondicionamiento radiante de baja temperatura en calefacción y alta temperatura en refrigeración, permite mejorar el rendimiento de las soluciones de generación convencionales, así como aprovechar recursos sostenibles que de otro modo resultaría inviable considerar. Además, estas posibilidades son incluso más amplias al explotar el potencial asociado a la inercia térmica de la estructura y deslocalización de la demanda en sistemas TABS. De acuerdo con esto, a continuación se recoge una relación de las principales fuentes de generación disponibles para la producción del agua caliente o fría que es impulsada al sistema.

En aplicaciones de calefacción la solución convencional se basa en la utilización de una caldera. Si bien, las temperaturas de impulsión requeridas (25–40°C) hacen posible la optimización del rendimiento ofrecido por tecnologías de baja temperatura y de condensación. Por la misma razón, la tecnología de bomba de calor, poco eficiente cuando se requieren niveles térmicos de impulsión elevados (condensador), se convierte en una opción capaz de cubrir la diferencia de temperaturas entre la demanda y distintos focos de energía naturales con rendimientos adecuados. Entre dichos focos cabe destacar el aprovechamiento de la energía del subsuelo (tanto el terreno como los acuíferos subterráneos) mediante bombas de calor tierra-agua o agua-agua, así como la utilización del aire del ambiente exterior (aeroterminia) a través de bombas aire-agua. Adicionalmente, en ciertas aplicaciones fundamentalmente en el ámbito industrial es posible plantear la recuperación de flujos de energía residuales de baja calidad o bajo contenido exergético. Por último, pese a ser una opción menos extendida, la utilización de sistemas radiantes también admite la integración de energía solar, especialmente a través de bombas de calor accionadas térmicamente (tecnología de absorción) [5, Babiak et al, 2009].

Por su parte, en aplicaciones de refrigeración las posibles fuentes de energía disponibles son muy similares, si bien presentan ciertas particularidades de mayor potencial. La solución convencional para la producción de agua fría está marcada por el uso de máquinas de refrigeración por compresión mecánica cuyo rendimiento se verá igualmente beneficiado. Estos equipos suelen estar condensados bien por aire, o bien por agua procedente de una torre de refrigeración, explotando directa o indirectamente el potencial de enfriamiento del aire ambiente. Asimismo, será posible plantear la utilización de bombas de calor reversibles, incluyendo la opción de disponer de equipos acoplados térmicamente al terreno .



Pese a que en comparación con la demanda general del edificio (iluminación, equipamiento, ventilación...) cualquiera de estas opciones supone ya de por sí una importante reducción del consumo energético, la diferencia fundamental en el aprovechamiento de estos recursos de energía naturales en aplicaciones de refrigeración, reside en que bajo multitud de condiciones de operación, este puede realizarse de forma directa sin necesidad de disponer de una bomba de calor intermedia. La conexión entre la producción (intercambiador geotérmico o torre de refrigeración) y la demanda, se realiza únicamente a través de un intercambiador agua-agua que separa los circuitos primario y secundario, dando lugar a modos de funcionamiento habitualmente referidos como 'free-cooling' [1, Andrés M., 2015].

No obstante, el potencial de estas alternativas dependerá por una parte de la tipología de sistema radiante planteada. El sistema TABS es, a priori, el más ventajoso, en tanto que permite aprovechar las condiciones favorables fuera del periodo de demanda, así como trabajar con niveles térmicos aún más moderados, que resultan más asequibles para un abastecimiento directo desde la producción. Asimismo, un segundo aspecto importante será el asociado a la localización particular de cada edificio y el potencial climático de tal emplazamiento [24, Lehman et al, 2011].

En cualquier caso, existen multitud de opciones diferentes destinadas a la generación de bajo consumo en referencia a este tipo de sistemas. En este apartado, se van a estudiar más a fondo dos puntos, la producción de agua fría mediante torres de enfriamiento y la de agua caliente mediante captadores solares.

II.3.1. Producción de agua fría en torres de enfriamiento

Para empezar este apartado es interesante partir de la definición y el funcionamiento de las torres de enfriamiento, también denominadas habitualmente torres de refrigeración (pese a que no proporcionen temperaturas inferiores a los 0 °C). Estas torres de refrigeración son sistemas termodinámicos destinados a enfriar masas de agua en procesos que requieren una disipación de calor.

El principio de enfriamiento de estos equipos se basa en la evaporación, el equipo produce una nube de gotas de agua bien por pulverización, bien por caída libre que se pone en contacto con una corriente de aire. La evaporación superficial de una pequeña parte del agua inducida por el contacto con el aire, da lugar al enfriamiento del resto del agua que cae en la balsa a una temperatura inferior a la de pulverización [25, SGSAS, 2003]

El uso más habitual de estos equipos está asociado a los sistemas de refrigeración, tanto en aire acondicionado como en producción de frío (hostelería, alimentación, laboratorios, etc.), sin embargo, en el ámbito industrial (Figura II.19) estos equipos se usan para el enfriamiento de cualquier parte de un proceso que genere calor y deba ser disipado (por ejemplo, procesos de molienda que generan calor por fricción, enfriamiento de reacciones exotérmicas, disipación de calor residual en centrales de producción de energía eléctrica...).

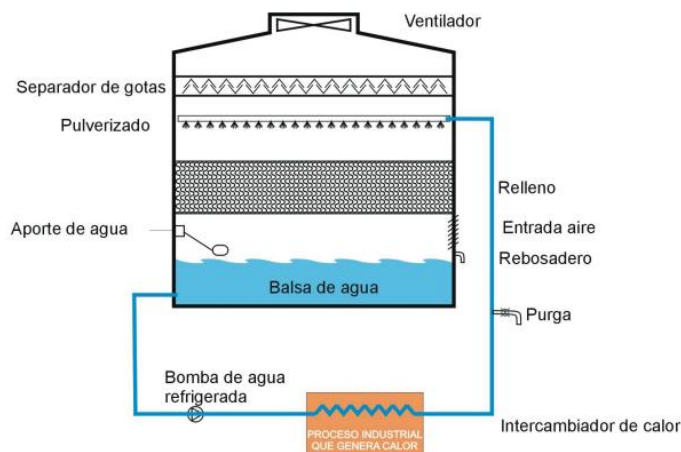


Figura II.19. Esquema de una torre destinada a la refrigeración de un proceso [25, SGSAS, 2003]

La producción de agua fría en torres de enfriamiento para abastecer los sistemas de acondicionamiento de los edificios se ha presentado como una interesante alternativa de cara a un uso racional y sostenible de la energía. Sin embargo, su capacidad de enfriamiento es limitada y está claramente ligada a las características del aire ambiente a través del límite físico impuesto por la temperatura de saturación adiabática o la temperatura de bulbo húmedo de este. Por esta razón, el éxito de esta tecnología pasa por ser capaz de producir agua fría en un circuito indirecto a una temperatura muy próxima a dicho límite [1, Andrés M., 2015].

II.3.2. Producción de agua caliente en captadores solares

Los captadores solares térmicos son dispositivos capaces de captar el calor procedente de la radiación solar y transmitirlo a un fluido para su posterior aprovechamiento en diversas aplicaciones, tanto domésticas como industriales [26, Roldán J., 2011].

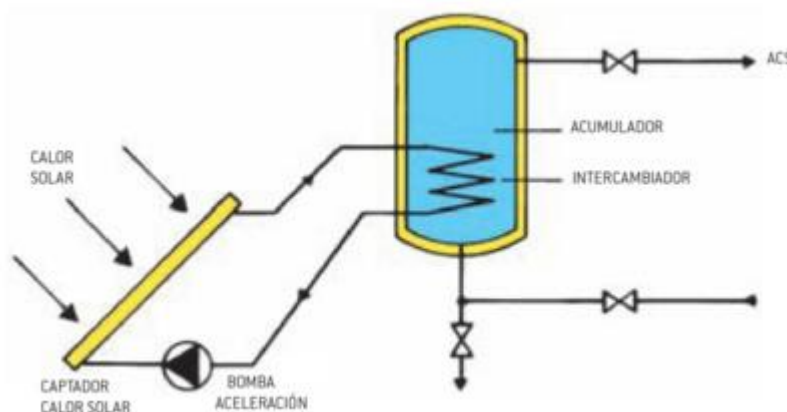


Figura II.20. Instalación de producción de agua caliente [26, Roldán J., 2011]

El funcionamiento del sistema conectado a los TABS consiste en un captador solar que absorbe el calor procedente de la radiación, este posee unos tubos, que forman parte de un circuito cerrado, por los cuales circula un fluido que se calienta a partir de este calor absorbido por el captador. Por otro lado el agua caliente que circula a través del sistema TABS intercambia el calor con el fluido caloportador del colector a través de un intercambiador de calor. De esta forma, el agua que circula por la edificación, calentada previamente en ese intercambiador, aporta calor de forma constante a la estructura del edificio y en consecuencia al ambiente interior.



II.4. Referencias

- [1] Andrés Chicote M. “Análisis energético y de confort térmico de estrategias sostenibles de acondicionamiento térmico de edificios basadas en Sistemas radiantes”. Año 2015
- [2] Bean R., Olesen B. W., Kim K. W. “History of radiant heating & cooling systems”. Año 2010.
Disponible en:
<http://naturalhomes.org/img/kang.pdf>
- [3] Prieto Nuria. “Gloria Castellana”. Año 2015.
Disponible en:
<http://tectonicablog.com/?p=63784>
- [4] Doreen Kalz. “Heating and cooling concepts employing environmental energy and thermo-active building systems for low- energy buildings”. Año 2009.
Disponible en:
http://www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/EnOB/Diss_TAB_S_Kalz_2009x.pdf
- [5] Babiak J., Olesen B. W., Petráš D. “Low temperature heating and high temperature cooling. Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations (REHVA)”. Año 2009.
Disponible en:
http://www.rehva.eu/fileadmin/Promotional_material/PPTs/Nr_20_Advance_system_sdesign_and_operation_of_GEOTABS.pdf
- [6] F.J. Rey Martínez, E. Velasco Gómez. “Sistemas de suelo radiante. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR)”. Año 2008.
- [7] Causone Francesco, Baldin Fabio, Bjarne W. Olesen, Stefano P. “Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations. Energy and Buildings”. Año 2010.
- [8] Ala-Juusela Mia. “Low exergy systems for heating and cooling of buildings. Heating and cooling with focus on increased energy efficiency and improved comfort”. Año 2003.
- [9] Frico. “Panel de Infrarojos Industrial”. Año 2014.
Disponible en:
http://www.arven.es/arven_new/files/IR.pdf
- [10] European Committee for Standardization- CEN. “EN 15377-1: Design of embedded water based surface heating and cooling systems”. Año. 2005



- [11] Solartel. “Suelo Radiante”. Año 2015
Disponible en:
<http://solartel.es/suelo-radiante/>
- [12] Mauersberger Frank. “Energy Efficiency In Commercial Buildings With Concrete Core Activation”. Año 2012.
Disponible en:
<http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1063&context=ihpbc>
- [13] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). “ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment”. Año 2000
- [14] Uponor. “Paneles radiantes”. Año 2014
Disponible en:
<https://www.uponor.de>
- [15] Zhang Lun, Liu Xiao-Hua, Jiang Yi. “Experimental evaluation of a suspended metal ceiling radiant panel with inclined fins. Energy and Buildings”. Año 2013.
Disponible en:
http://ac.els-cdn.com/S0378778813002120/1-s2.0-S0378778813002120-main.pdf?_tid=2779c580-0612-11e6-94da-00000aab0f27&acdnat=1461058752_fb80b36b15175f11b931e98052fe2606
- [16] Healthy Heating. “Dedicated Outside Air Systems (DOAS) and the hybrid HVAC system”. Año 2012.
Disponible en:
http://www.healthyheating.com/DOAS/DOAS_Introduction.htm#.VxdjQ9Sg-9I
- [17] Beat Lehmann, Viktor Dore, Markus Koschenz. “Application range of thermally activated building systems tabs”. Año 2007.
- [18] Maarten Sourbron. “PhD Thesis. Dynamic thermal behaviour of buildings with concrete core activation”. Año 2012.
- [19] J. Kolarik. “Simulation of energy use, human thermal comfort and office work performance in buildings with moderately drifting operative temperatures”. Año 2011.
- [20] Markus Koschenz, Viktor Dorer “Interaction of an air system with concrete core conditioning. Energy and Buildings”. Año 1999.



- [21] D.O. Rijksen, C.J. Wisse, A.W.M. van Schijndel. “Reducing peak requirements for cooling by using thermally activated building systems. Energy and Buildings”. Año 2010.
- [22] M. Gwerder, J. Tödtli, B. Lehmann, V. Dorer, W. Güntensperger, F. Renggli. “Control of thermally activated building systems (TABS) in intermittent operation with pulse width modulation”. Año 2009.
- [23] Maarten Sourbron. “Dynamic thermal behaviour of buildings with concrete core activation. Katholieke Universiteit Leuven”. Año 2012.
- [24] B. Lehmann, V. Dorer, M. Gwerder, F. Renggli, J. Tödtli. “Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system”. Año 2011.
- [25] Subdirección General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral. “Guía técnica para la prevención y control de la legionelosis en instalaciones”. Año 2003.
Disponible en:
http://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/4_leg.pdf
- [26] José Roldán Vitoria. “Estudios de viabilidad de instalaciones solares. Determinación del potencial solar”. Año 2011.





Capítulo III

Dispositivo Experimental y Trabajos Previos

Índice de contenido

III.1. Dispositivo experimental	101
III.1.1. Dispositivo con Hormigón.....	105
III.1.2. Dispositivo con mezcla de áridos.....	107
III.2. Equipos de medida.....	109
III.2.1. Sondas de Temperatura.....	110
III.2.2. Sistema de Adquisición de Datos de las Sondas	113
III.2.3. Horno de Calibración de Temperatura	115
III.2.4. Termoflujómetro.....	116
III.2.5. Sistema de Adquisición de Datos del Termoflujómetro	117
III.2.6. Multímetro.....	118
III.3. Trabajos previos de caracterización de materiales.....	119
III.3.1. Densidad del cemento	119
III.3.2. Densidad de la grava	120
III.3.3. Densidad de la arena	121
III.3.4. Densidad del hormigón húmedo	122
III.3.5. Densidad del hormigón seco.....	122
III.3.6. Densidad de mezcla de áridos	123
III.4. Referencias.....	124



Índice de Figuras

Figura III.1. Base de material aislante	101
Figura III.2. Losa de aglomerado con circuito eléctrico.....	102
Figura III.3. Temperatura del cable conectado	102
Figura III.4. Estructura exterior de madera	102
Figura III.5. Dispositivo con placa de Aluminio	103
Figura III.6. Dispositivo experimental completo	103
Figura III.7. Dispositivo con hormigón húmedo	105
Figura III.8. Equilibrado superficie de hormigón mediante nivel	105
Figura III.9. Dispositivo con hormigón seco	106
Figura III.10. Base de hormigón del dispositivo con mezcla de áridos.....	107
Figura III.11. Dispositivo final con base de hormigón y espacio para rellenar.....	107
Figura III.12. Dispositivo experimental completado con áridos de distintos tamaños...	108
Figura III.13. Nivel altura losa de áridos.....	108
Figura III.14. Elementos de una sonda termométrica resistiva [2, Alonso M., 2013]	110
Figura III.15. Esquema de una sonda termométrica resistiva [1, Arian, 2011]	110
Figura III.16. Curvas usuales de resistencia relativa en función de la temperatura para alambre de Platino, Cobre y Niquel [3, Escaloma I., 2003]	111
Figura III.17. Sonda Pt100 [2, Alonso M., 2013].....	112
Figura III.18. Configuración del sistema de adquisición de datos [2, Alonso M., 2013] .	113
Figura III.19. Adquisidor de datos Aligent 34972 [4, Agilent Tech, 2010].....	114
Figura III.20. Horno de calibración de temperatura FLUKE 9103 [5, Fluke, 2008].....	115
Figura III.21. Termoflujómetro FQA018CSI [7, Safer, 2016].....	116
Figura III.22. Adquisidor de datos Almemo 2390-5 [8, Ahlborn, 2005]	117
Figura III.23. Multímetro Brymen BM155 [9, TEM, 2016].....	118
Figura III.24. Pesado de grava	120
Figura III.25. Pesado de arena	121
Figura III.26. Pesado de hormigón húmedo	122
Figura III.27. Pesado de hormigón seco	123

III.1. Dispositivo experimental

El objetivo del dispositivo de este trabajo es poder introducir en él un determinado material en unas condiciones y cantidades determinadas de tal forma que se pueda medir en diferentes puntos de dicho material datos como la temperatura y el flujo de calor, para así, poder medirlos cuantificarlos y sacar las conclusiones pertinentes.

Esta es la estructura general del dispositivo:

Se ha partido de la base creada a partir de material aislante (Figura III.1) con forma similar a un recipiente cuadrado para así poder albergar en él, el material correspondiente. Este aislante ha sido elegido para facilitar que el flujo de calor se dé a través del material que introduciremos en nuestro dispositivo (hormigón o áridos) y no a través de las paredes ni de la base de este recipiente.



Figura III.1. Base de material aislante

Con el objetivo de poder aumentar la temperatura del material a introducir se ha insertado un circuito eléctrico (Figura III.2). Para ello se ha recortado una placa de aglomerado de pequeño espesor y del mismo área que la base de nuestro recipiente y sobre este material se ha distribuido y fijado uniformemente el cableado. Este cable es de una elevada resistividad para facilitar el aumento de la temperatura. Se ha adjuntado una segunda imagen (Figura III.3) obtenida de una cámara termográfica para observar el comportamiento térmico del cable.

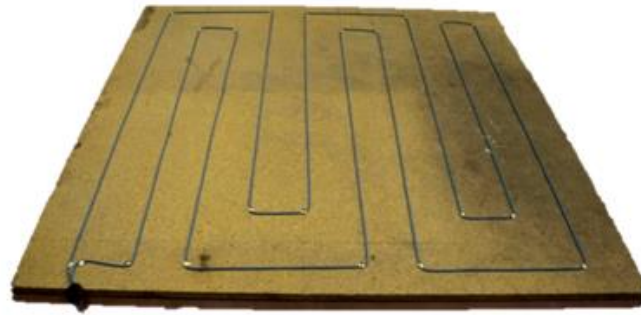


Figura III.2. Losa de aglomerado con circuito eléctrico

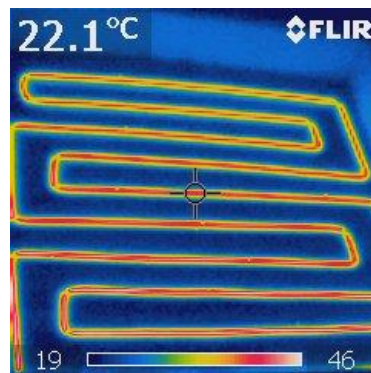


Figura III.3. Temperatura del cable conectado

Se ha tenido en cuenta que, cómo dentro de este recipiente se va a fraguar el hormigón en un proceso posterior, las paredes de soporte han de disponer de una resistencia adecuada para que el hormigón no las desplace. Para evitar esto se ha reforzado la estructura exteriormente al material aislante con cuatro placas de madera fijadas con clavos (Figura III.4).



Figura III.4. Estructura exterior de madera



Como se puede apreciar en las imágenes anteriores se ha realizado un taladrado en un extremo de la estructura para sacar la parte del cable que se va a conectar a la toma de corriente.

Para conseguir una distribución de temperatura uniforme en la losa de hormigón se va a introducir, entre esta y los cables, una placa de Aluminio (Figura III.5) de espesor aproximado de 2mm ya que, de no hacerlo, se calentarían más las zonas del hormigón con cable en la parte inferior que las que no lo tuvieran.



Figura III.5. Dispositivo con placa de Aluminio

El siguiente paso es introducir en el dispositivo una serie de tubos de Cobre colocados con una disposición determinada (Figura III.6). Estos tubos están para poder introducir las sondas a través de estos y así poder calcular las temperaturas en los puntos deseados. Que el material elegido para los tubos sea Cobre implicará una buena transmisión del calor y una resistencia suficientemente alta como para soportar los esfuerzos realizados por el hormigón en su proceso de fraguado.



Figura III.6. Dispositivo experimental completo



La disposición tubular va a ser:

- 2 tubos paralelos a 333 mm de distancia entre sí y 333 mm de distancia a los bordes del recipiente respectivamente. Ambos a una altura de 50 mm por encima de la placa de Aluminio. En ellos vamos a introducir 4 sondas (2 por cada tubo) a una profundidad de 333 mm por los extremos de cada tubo, de tal forma que entre ellas formen un cuadrado.
- 2 tubos paralelos a 333 mm de distancia entre sí y 333 mm de distancia a los bordes del recipiente respectivamente. Ambos a una altura de 100 mm por encima de la placa de Aluminio y colocados en disposición perpendicular a los 2 tubos anteriores. En ellos vamos a introducir 4 sondas (2 por cada tubo) a una profundidad de 333 mm por los extremos de cada tubo, de tal forma que entre ellas formen un cuadrado.
- 1 tubo paralelo a los dos anteriores dispuesto en contacto con la placa de Aluminio. En este solo vamos a introducir una sonda a 500 mm del extremo del tubo de cobre para medir directamente la temperatura de la placa.

Una vez realizada toda la estructura será necesaria una correcta distribución de los aparatos de medición a lo largo de esta, para así poder tener las máximas referencias de lo que ocurre y que el experimento sea lo más riguroso posible. Para ello vamos a introducir una cantidad de 17 sondas en diferentes puntos y un termo-flujómetro en la superficie de lo que va a ser la losa.

Esta es la distribución de los aparatos de medición por los diferentes planos del dispositivo experimental.

- Plano a 0cm de la placa de Aluminio: Sonda 1
- Plano a 5cm de la placa de Aluminio: Sondas 2, 3, 4 y 5
- Plano a 10cm de la placa de Aluminio: Sondas 6, 7, 8 y 9
- Plano a 15cm de la placa de Aluminio (superficie): Sonda 10 y termoflujómetro
- Plano a 3.5cm de la placa de Aluminio: Sonda 11
- Plano a 7cm de la placa de Aluminio: Sonda 12
- Plano a 10.5cm de la placa de Aluminio: Sonda 13
- Plano a 14cm de la placa de Aluminio: Sonda 14
- Temperatura del aire de la sala: Sonda 15
- Plano de las paredes interiores de la sala: Sondas 16 y 17



III.1.1. Dispositivo con Hormigón

Para realizar el experimento el primer material utilizado va a ser hormigón (Figura III.7) en una proporción de 4 unidades de áridos por cada unidad de cemento. Este material ya habrá fraguado y endurecido cuando empecemos a realizar los ensayos.

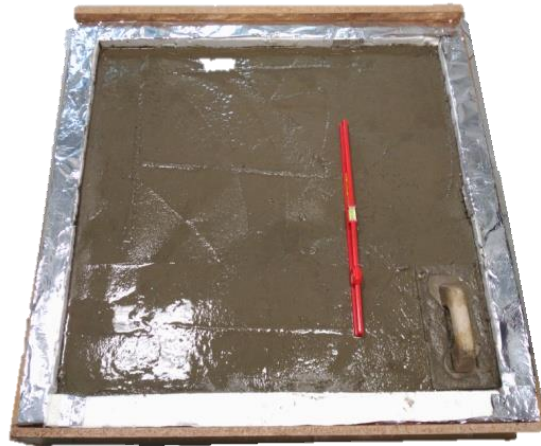


Figura III.7. Dispositivo con hormigón húmedo

Para el equilibrado de la superficie se va a utilizar un nivel que se va a disponer de la siguiente forma (Figura III.8).



Figura III.8. Equilibrado superficie de hormigón mediante nivel

Esta es la forma en la que se han dispuesto los diferentes dispositivos de medición y almacenamiento de datos en este caso y una vez el hormigón ya haya fraguado y endurecido (Figura III.9).



Figura III.9. Dispositivo con hormigón seco

III.1.2. Dispositivo con mezcla de áridos

Para realizar el nuevo dispositivo de experimentación, la base utilizada ha sido una losa de hormigón (Figura III.10) con una superficie de un metro cuadrado (1x1) y un ancho de 50mm. Este material va a actuar como base del dispositivo y sobre él se va a posicionar una mezcla de varios materiales en unas proporciones determinadas para buscar la misma densidad y conductividad que el hormigón.

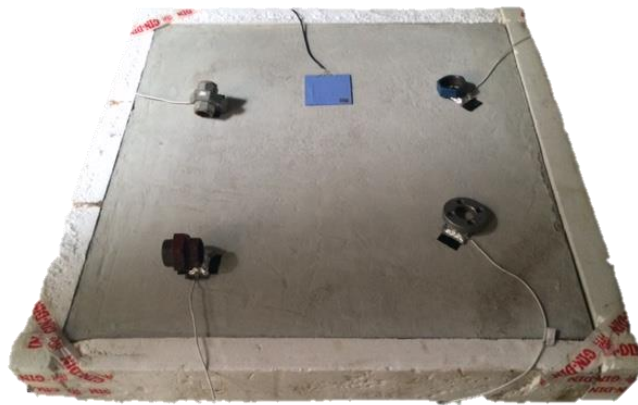


Figura III.10. Base de hormigón del dispositivo con mezcla de áridos

La forma en la que se ha situado la losa es la siguiente (Figura III.11). Como se puede observar se han dejado una serie de escalonamientos para llenar el espacio disponible hasta el espesor que se desee.

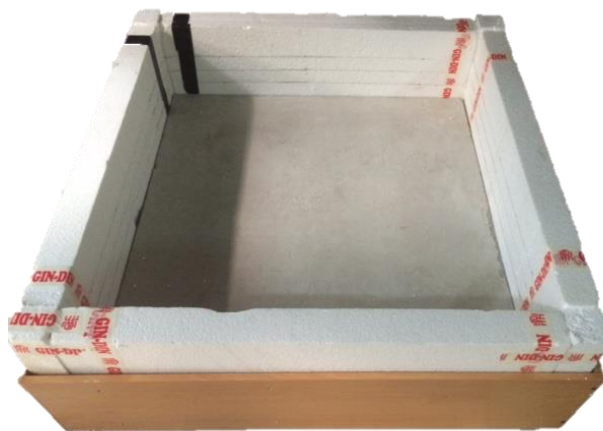


Figura III.11. Dispositivo final con base de hormigón y espacio para rellenar

En este caso se ha llenado dicho espacio con áridos hasta alcanzar una altura de 15cm respecto a la placa de Aluminio y se han colocado las sondas y el termoflujómetro exactamente en la misma posición en que se hizo en el caso de la losa de hormigón.

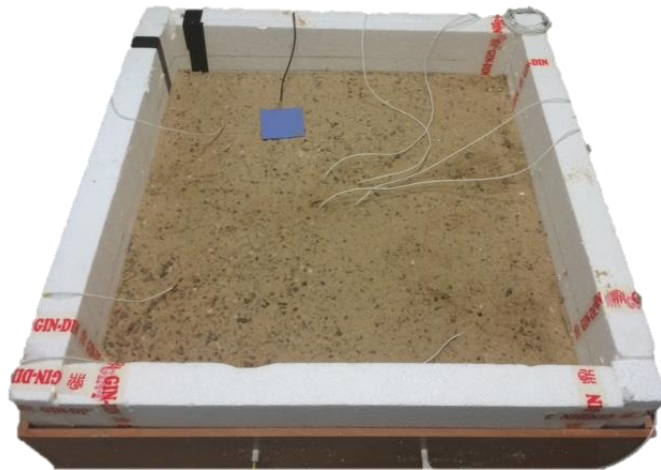


Figura III.12. Dispositivo experimental completado con áridos de distintos tamaños

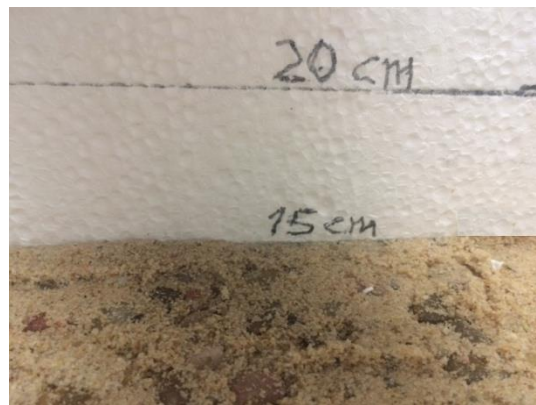


Figura III.13. Nivel altura losa de áridos



III.2. Equipos de medida

Para el cálculo de temperaturas en la losa de hormigón se van a necesitar los correspondientes dispositivos que faciliten estos datos de forma rápida y precisa. Para ello se van a utilizar sondas de temperatura, que serán las encargadas de medir una determinada temperatura en diferentes puntos de la losa, conectadas a un adquisidor que es el elemento que va a llevar a cabo la recogida de datos procedentes de la sonda. Hay que matizar que la toma de datos procedentes de la sonda tiene un cierto error, por ello hay que calibrarlas para obtener el dato real. Para la calibración de las sondas es necesario utilizar un horno de calibración de temperatura. Por otro lado se va a situar un termoflujómetro en la superficie para medir el flujo de calor de la losa de hormigón al exterior con su correspondiente adquisidor. Por último para comprobar que la placa de Aluminio se está calentando se necesita un multímetro que va a medir: resistencias, intensidades y otros datos del hilo a calentar.

Estos son todos los elementos utilizados en dicho proceso que son:

- Sondas de temperatura
- Sistema de adquisición y Software de monitorización de datos de las sondas
- Horno de calibración de temperatura
- Termoflujómetro
- Sistema de adquisición y Software de monitorización de datos del termoflujómetro
- Multímetro

III.2.1. Sondas de Temperatura

Las sondas de temperatura utilizadas en este trabajo son del tipo Termorresistivo que consisten en un alambre de platino cuya resistencia a 0°C es de 100Ω y que al aumentar su temperatura aumenta dicha resistencia de forma proporcional.

Dicho incremento es lineal y creciente de tal forma que mediante tablas y regresiones de datos podemos calcular la temperatura exacta de los puntos deseados.

En cuanto a su estructura (Figura III.12) la sonda se encuentra encapsulada dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material donde en un extremo se encuentra el elemento sensible, que es el alambre de platino y en otro el terminal eléctrico de los cables. Además puede llegar a tener la precisión superior a una décima de grado y pueden colocarse a una amplia distancia del medidor (hasta 30 metros utilizando una extensión de hilo de cobre). [2, Alonso M., 2013]

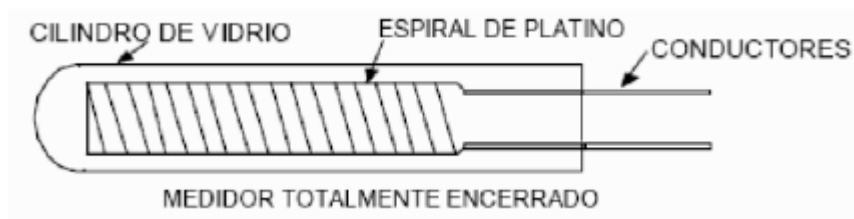


Figura III.14. Elementos de una sonda termométrica resistiva [2, Alonso M., 2013]

El montaje de estas sondas se puede realizar con conexión a 2, 3 o 4 hilos (Figura III.13) siendo las de 4 hilos las más precisas.

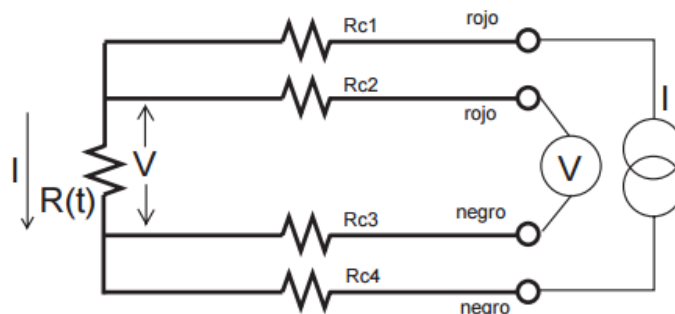


Figura III.15. Esquema de una sonda termométrica resistiva [1, Arian, 2011]



Hay que destacar que el material del conductor se caracteriza por su coeficiente de temperatura α de la forma de la ecuación (Eq III. 1):

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (\text{Eq III. 1})$$

Dónde:

R_t Resistencia (Ω) a temperatura t ($^{\circ}\text{C}$)

R_0 Resistencia (Ω) a 0°C

α Coeficiente de temperatura de la resistencia

Como se puede observar se produce una variación de la resistencia relativa en función de la temperatura, variando así para diferentes tipos de materiales (Figura III.14).

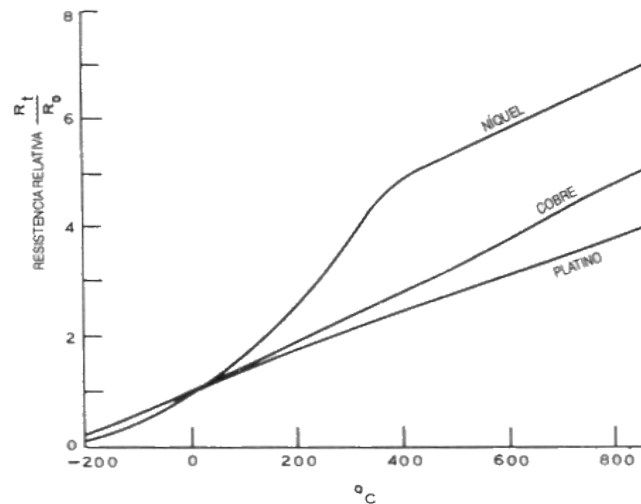


Figura III.16. Curvas usuales de resistencia relativa en función de la temperatura para alambre de Platino, Cobre y Níquel [3, Escaloma I., 2003]

Los materiales que forman el conductor deben tener las siguientes características mecánicas:

- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, para que el instrumento sea lo más sensible posible.
- Alta resistividad, para que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura determinada, mayor sensibilidad tendremos.
- Relación lineal Resistencia-Temperatura
- Rigidez y ductilidad, para así poder estirar y enrollar el conductor en las bobinas de la sonda [3, Escaloma I., 2003].

Como ya se ha visto antes la sonda va a ser de Platino. Que se haya elegido este material se debe a los siguientes factores:

Desde el punto de vista de precisión y estabilidad es el material más usado, aunque presenta el inconveniente del coste. La sonda de resistencia de Platino usada tiene una resistencia de 100Ω a 0°C , que aumenta en 0.1Ω por grado de elevación de la temperatura. Esto se debe a un aumento de la resistividad del 0.39% por grado de elevación de la temperatura.

Según lo visto, al tener un R_0 de 25.5Ω (coincide con R_t a 0°C), cuando nuestra temperatura aumenta hasta los 100°C R_t pasa a valer 35.5°C .

Una sonda de este tipo convenientemente graduada puede realizar medidas de 0.01°C de exactitud [3, Escaloma I., 2003].

En concreto nosotros hemos utilizado:

Sonda Pt100 Clase A (Figura III.15)

- Uso de -50°C a 500°C .
- Construcción con película delgada.
- Superficie ajustada y protegida.
- Resistentes a la vibración.
- Tipo de sensor Pt100 (100Ω @ 0°C).
- Película de 10nm .
- Respuesta térmica de 0.1s .
- Estabilidad de $\pm 0.05\%$.
- Auto-calentamiento $< 0.05^\circ\text{C}/\text{mW}$ [2, Alonso M., 2013].

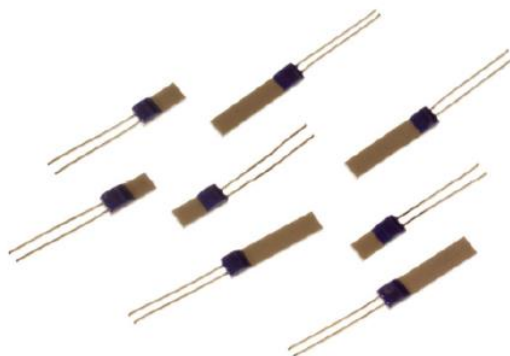


Figura III.17. Sonda Pt100 [2, Alonso M., 2013]

III.2.2. Sistema de Adquisición de Datos de las Sondas

Las medidas tomadas por los sensores de temperatura deben ser recogidas por medio del correspondiente sistema adquisición de datos (SAD). Este debe servir de interfaz entre el computador digital y el sistema físico, permitiendo capturar, acondicionar y procesar las señales eléctricas procedentes de diversos tipos de sensores (en este caso únicamente sondas Pt100). Las señales serán transformadas, por el software de monitorización de datos, en valores numéricos que serán registrados en una hoja de texto. Para que esto suceda se necesita un dispositivo de almacenamiento externo USB para la recogida de datos. De esta manera se pueden extraer estos datos, integrarlos en nuestro ordenador y darles uso en una hoja de Excel para hacer los cálculos necesarios y extraer las conclusiones pertinentes de la toma de datos.

Esta sería la forma esquemática de recogida de datos de la sonda y de cómo los llevamos a nuestro ordenador (Figura III.16)

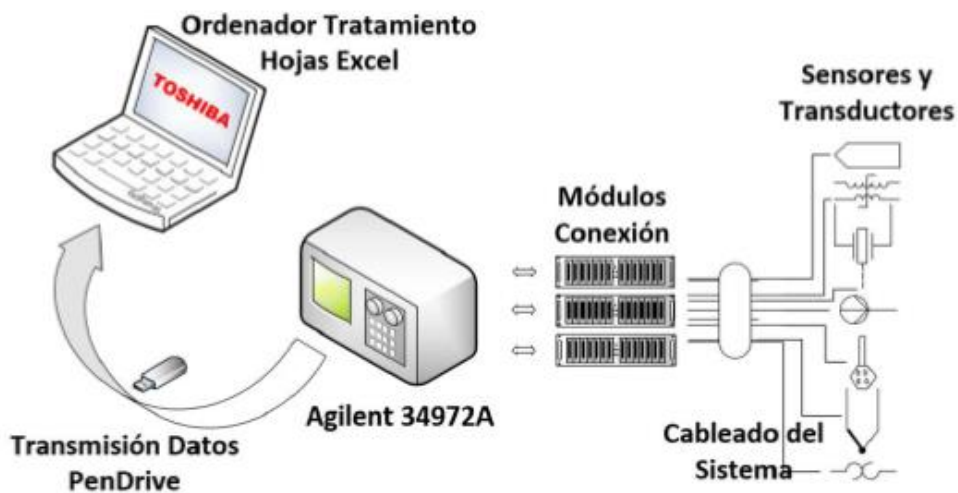


Figura III.18. Configuración del sistema de adquisición de datos [2, Alonso M., 2013]

En este caso el elemento de registro utilizado es:

Adquisidor de datos Aligent 34972A (Figura III.17)

- Mainframe de 3 ranuras con multímetro digital de 6½ dígitos incorporado y 8 módulos conectables de conmutación y de control opcionales.
- Opciones de I/O Gigabit LAN, USB, GPIB o RS-232 para facilitar la conectividad con el PC.
- Interfaz gráfica web para monitorización y control mediante el ratón (34972A).
- Compatibilidad con unidades USB Flash para copiar/registrar datos en aplicaciones independientes (34972A).
- Mide y convierte 11 señales de entrada distintas: temperatura con termopares, RTD y termistores; tensión DC/AC; resistencia a 2 y 4 hilos; frecuencia y periodo [4, Agilent Tech, 2010].



Figura III.19. Adquisidor de datos Aligent 34972 [4, Agilent Tech, 2010]



III.2.3. Horno de Calibración de Temperatura

Durante el proceso de calibración de las sondas se va a necesitar de un dispositivo que proporcione un rango de temperaturas reales. Este dispositivo es el horno de calibración de temperatura (rango de calibración entre -25 y 140°C) y tiene la función de fijar una temperatura adecuada en su interior para que, introduciendo las sondas, podamos calcular el error de medida de estas comparando el valor real que fija el horno y el que nos proporciona la sonda a través del sistema de adquisición. En un anexo se van a incluir todas las rectas y los datos hallados en la calibración de las sondas.

El dispositivo que se ha utilizado es:

Horno FLUKE 9103 (Figura III.18)

- Ligero y con gran facilidad de transporte.
- Precisión de hasta $0,25^{\circ}\text{C}$.
- RS-232 y software Interface-it incluidos.
- Temperaturas de -25°C a 140°C .
- Tiempo de estabilización 7min.
- Tiempo de calentamiento 18min (0°C - 140°C).
- Tiempo de enfriamiento 20min (0°C - -25°C) [5, Fluke, 2008].



Figura III.20. Horno de calibración de temperatura FLUKE 9103 [5, Fluke, 2008]

III.2.4. Termoflujómetro

Para la medición del flujo calorífico a través de la superficie de la losa analizada se emplea un termoflujómetro. Este instrumento permite determinar el flujo de calor que atraviesa una superficie plana. Consiste en una placa de espesor definido y cuyo coeficiente de transmisión calorífica es conocido. En cada una de las caras lleva fijados varios termómetros. La placa así constituida debe fijarse de modo firme sobre la pared o cerramiento donde quiere medirse el flujo de calor que los atraviesa [6, S.LOW ENERGY, 2007].

En este trabajo el aparato usado es:

Termoflujómetro FQA018CSI (Figura III.19)

- Medidas (mm) 120x120x3.
- Material Silicona.
- Rango de temperaturas de -40°C a 80°C .
- Exactitud del valor de calibración 5% a 23°C .
- Temperatura nominal 23°C [7, Safer, 2016].

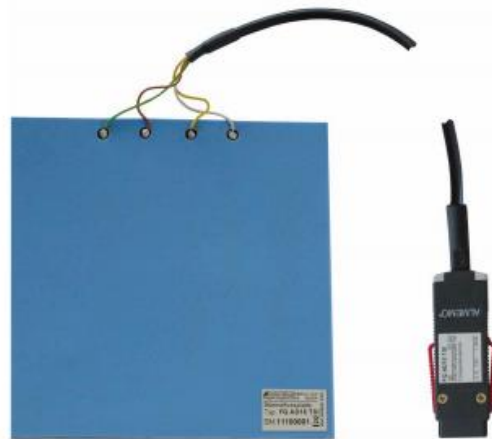


Figura III.21. Termoflujómetro FQA018CSI [7, Safer, 2016]



III.2.5. Sistema de Adquisición de Datos del Termoflujómetro

El modo de operación es exactamente el mismo al utilizado para registrar los datos de las sondas de temperatura, por tanto la definición de su funcionamiento será la misma que la del apartado 1.3.

El aparato de medida utilizado es:

Adquisidor de datos Almemo 2390-5 (Figura III.2.3)

- 4 Canales.
- Convertidor A/D Delta-Sigma 16bit.
- Memoria de 32kB de 3700 a 6000 medidas.
- 7-9V 100mA máximo [8, Ahlborn, 2005].



Figura III.22. Adquisidor de datos Almemo 2390-5 [8, Ahlborn, 2005]

III.2.6. Multímetro

Para medir directamente magnitudes eléctricas como: corrientes, resistencias, potenciales... se va a necesitar de un multímetro, que es el dispositivo portátil que proporciona dichos datos, ya sea corriente continua o alterna. Este dispositivo actúa como amperímetro, voltímetro, óhmetro... En este trabajo se ha usado concretamente para medir la intensidad de corriente que circula por el hilo. Con este dato y conociendo la diferencia de potencial se ha calculado la energía disipada por dicho hilo en el capítulo IV.

En este caso se ha usado:

Multímetro Brymen BM155 (Figura III.21)

- Diámetro máximo cable 45mm.
- LCD (4000) para medición de corriente, LCD (6000) para medición de tensión, LCD (9999) para medición de otros valores.
- Rango medición corriente de 0.1 a 1000^a.
- Rango medición tensión en continua y alterna de 0.1 a 600V.
- Rango medición resistencia 0.1 Ω a 999.9 Ω .
- Rango medición temperatura de -50°C a 300°C [9, TEM, 2016].



Figura III.23. Multímetro Brymen BM155 [9, TEM, 2016]



III.3. Trabajos previos de caracterización de materiales

Estos trabajos van a consistir en el cálculo de densidades. Para el cálculo de estos datos se va a partir de la base de un recipiente vacío de volumen desconocido. Una vez conocido el volumen de este recipiente se podrá llenar del material deseado, para después pesarlo y calcularlo con la fórmula siguiente (Eq III.2):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq III. 2})$$

Siendo:

ρ Densidad del material (Kg/m^3)

m Masa del material (Kg)

V Volumen del material (m^3)

Como se ha indicado antes, el volumen es desconocido. Para ello se va a llenar el recipiente de agua ya que es un fluido del cual es conocida la densidad ($1000 Kg/m^3$) y con la masa que nos indique el peso podremos calcular el volumen del recipiente mediante la ecuación (Eq III.2):

$$1000 Kg/m^3 = \frac{1,7 Kg}{V} \rightarrow V = 1,7 \cdot 10^{-3} m^3$$

Con este dato ya se puede medir las diferentes densidades de cada uno de los materiales que van a formar parte de nuestros experimentos.

III.3.1. Densidad del cemento

Para calcular este dato se llenará el recipiente anterior de cemento y se medirá su masa. Sabiendo el volumen de este y la masa, calcular la densidad será solo aplicar la ecuación (Eq III.2):

$$\rho_{cemento} = \frac{m_{cemento}}{V} = \frac{2,4115Kg}{1,7 \cdot 10^{-3} m^3} \rightarrow \rho_{cemento} = 1410,02 Kg/m^3$$

III.3.2. Densidad de la grava

Para calcular este dato se llenará el recipiente de grava (Figura III.22) y se medirá la masa. El cálculo será igual al del apartado anterior y se utilizará la fórmula (Eq III.2):

$$\rho_{aparente\ grava} = \frac{m_{grava}}{V} = \frac{3,2155Kg}{1,7 \cdot 10^{-3}m^3}$$
$$\rightarrow \rho_{aparente\ grava} = 1880,4 \text{ Kg}/m^3$$

Se va a proceder a llenar el recipiente anterior hasta que rebose de agua para rellenar los espacios que aparecen entre las piedras que forman la grava. Posteriormente se calculará el volumen de agua que existe en el recipiente y se restará al volumen ocupado por los áridos.

Para calcular la densidad se aplicará la ecuación (Eq III.2) en los apartados anteriores:

$$m_{agua} = m_{total} - m_{grava} = 3,7945Kg - 3,2155Kg = 0,579kg$$
$$V_{nuevo} = 1,7 \cdot 10^{-3}m^3 - 0,579 \cdot 10^{-3}m^3 = 1,121 \cdot 10^{-3}m^3$$
$$\rho_{grava} = \frac{m_{grava}}{V_{nuevo}} = \frac{3,2155Kg}{1,121 \cdot 10^{-3}m^3} \rightarrow \rho_{grava} = 2843,1 \text{ Kg}/m^3$$

Como es lógico al disminuir el volumen ocupado por la grava debido a la adicción de agua aumentará la densidad.



Figura III.24. Pesado de grava



III.3.3. Densidad de la arena

Se va a cambiar el material del recipiente por arena (Figura III.23) y aplicando la fórmula (Eq III.2) se obtiene la densidad aparente:

$$\rho_{aparente\ arena} = \frac{m_{arena}}{V} = \frac{2,5315Kg}{1,7 \cdot 10^{-3}m^3}$$

$$\rightarrow \rho_{aparente\ arena} = 1480,4 \text{ Kg}/m^3$$

Como se ha hecho con la grava anteriormente, se van a llenar los espacios entre los granos de arena con agua y a calcular la densidad real mediante la ecuación (Eq III.2).

$$m_{agua} = m_{total} - m_{arena} = 3,1095Kg - 2,5315Kg = 0,578Kg$$

$$V_{nuevo} = 1,7 \cdot 10^{-3}m^3 - 0,578 \cdot 10^{-3}m^3 = 1,122 \cdot 10^{-3}m^3$$

$$\rho_{arena} = \frac{m_{arena}}{V_{nuevo}} = \frac{2,5315Kg}{1,122 \cdot 10^{-3}m^3} \rightarrow \rho_{arena} = 2236,3 \text{ Kg}/m^3$$

Se aprecia en este caso también el aumento de densidad al reducir el volumen ocupado por la arena.



Figura III.25. Pesado de arena

III.3.4. Densidad del hormigón húmedo

En este caso se va a rellenar el recipiente con una proporción en volumen de cuatro unidades de arena con grava por una unidad de cemento y la cantidad necesaria de agua para obtener el hormigón húmedo (Figura III.24). Mediante la ecuación (Eq III.2) se obtiene:

$$\rho_{\text{hormigón hum}} = \frac{m_{\text{hormigón hum}}}{V} = \frac{4,088 \text{Kg}}{1,7 \cdot 10^{-3} \text{m}^3}$$

$$\rightarrow \rho_{\text{hormigón hum}} = 2404,7 \text{Kg}/\text{m}^3$$



Figura III.26. Pesado de hormigón húmedo

III.3.5. Densidad del hormigón seco

Si se deja pasar el tiempo necesario, el agua se evapora y se producen los procesos de fraguado y endurecimiento del hormigón (Figura III.25). De esta manera se puede calcular la densidad de este material (Eq III.2):

$$\rho_{\text{hormigón seco}} = \frac{m_{\text{hormigón seco}}}{V} = \frac{3,870 \text{Kg}}{1,7 \cdot 10^{-3} \text{m}^3}$$

$$\rightarrow \rho_{\text{hormigón seco}} = 2276,4 \text{Kg}/\text{m}^3$$

Este va a ser uno de los datos más importantes de trabajo ya que parte de los experimentos van a realizarse directamente sobre este material.



Figura III.27. Pesado de hormigón seco

III.3.6. Densidad de mezcla de áridos

Esta va a ser la densidad de la composición que, junto con el cemento y agua, va a formar la mezcla del hormigón. Se va a calcular mediante el uso de la fórmula (Eq III.2). Hay que tener en cuenta que se ha cambiado el recipiente por uno de 1,069L.

$$\rho_{\text{aparente áridos}} = \frac{m_{\text{áridos}}}{V} = \frac{1,900\text{Kg}}{1,069 \cdot 10^{-3}\text{m}^3}$$

$$\rightarrow \rho_{\text{aparente áridos}} = 1777,36 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

Ahora se va a calcular la cantidad de volumen no llenada por los áridos para acabar con el cálculo de la densidad de los áridos.

$$m_{\text{agua}} = m_{\text{total}} - m_{\text{áridos}} = 2,151\text{Kg} - 1,900\text{Kg} = 0,251\text{Kg}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 1,069 \cdot 10^{-3}\text{m}^3 - 0,251 \cdot 10^{-3}\text{m}^3 = 0,818 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$$

$$\rho_{\text{áridos}} = \frac{m_{\text{áridos}}}{V_{\text{nuevo}}} = \frac{1,900\text{Kg}}{0,818 \cdot 10^{-3}\text{m}^3} \rightarrow \rho_{\text{áridos}} = 2322,7 \text{ Kg}/\text{m}^3$$



III.4. Referencias

- [1] Arian. “Pt 100, Operación, instalación y tablas”. Año 2011.
Disponible en:
<http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>
- [2] Manuel Alonso Rodriguez. “Caracterización experimental de un prototipo de enfriamiento gratuito (Free-Cooling) por agua”. Año 2013.
- [3] Ivan Escaloma Moreno. “Termómetros en la instrumentación y control industrial”. Año 2003.
Disponible en:
<http://www.revistaciencias.com/publicaciones/EpyuZlkyIFxBEZLhkT.php>
- [4] Agilent Technologies. “Agilent 34970A Familia de unidades de adquisición de datos/conmutación”. Año 2010.
Disponible en:
http://www.ayscom.com/data_sheets/agilent/adquisicion_de_datos/34970_72a.pdf
- [5] Fluke. “Hornos secos de campo 9103, 9140 y 9141”. Año 2008
Disponible en:
http://www.adler-instrumentos.es/imagenes_web/productos/fluke%209103-9140-9141.pdf
- [6] S.LOW ENERGY. “Análisis termoflujométrico”. Año 2007
Disponible en:
http://tecno.sostenibilidad.org/index.php?option=com_content&task=view&id=117&Itemid=161
- [7] Safer. “Building Physics, Moisture in Materials”. Año 2016
Disponible en:
http://www.saferinstrument.com/productos/medidas_fisicas/SONDAS_SENSORES_AMR/CONSTRUCCION.pdf
- [8] Ahlborn. “Almemo measuring Instruments”. Año 2005
Disponible en:
<http://www.m-r-c.co.il/media/Uploads/MA23905SPEC.pdf>
- [9] TEM. “BRYMEN BM 155”. Año 2016
Disponible en:
<http://www.tme.eu/es/details/bm155/medidores-de-pinza-ac/brymen/>



Capítulo IV

Planteamiento del Estudio y Análisis de Resultados

Índice de contenido

IV.1. Introducción.....	127
IV.2. Cálculo de la conductividad térmica K del hormigón	128
IV.3. Comprobación del flujo de calor a través de la losa de hormigón de 150mm.....	133
IV.3.1. Calentamiento 1h y enfriamiento hasta estabilizar	136
IV.3.2. Calentamiento 2h y enfriamiento hasta estabilizar	138
IV.3.3. Calentamiento 4h y enfriamiento hasta estabilizar	140
IV.3.4. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario	142
IV.3.5. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario	144
IV.4. Cálculo de la difusividad térmica del hormigón	146
IV.5. Cálculo de la conductividad térmica K de los áridos	147
IV.6. Comprobación del flujo de calor a través de la losa de áridos de 100mm.....	151
IV.6.1 Calentamiento 1h y enfriamiento hasta estabilizar	152
IV.6.2. Calentamiento 2h y enfriamiento hasta estabilizar	154
IV.6.3. Calentamiento 3 h y enfriamiento hasta estabilizar.....	156
IV.6.4. Calentamiento 4 h y enfriamiento hasta estabilizar.....	158
IV.6.5. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario	160
IV.6.6. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario	163
IV.7. Cálculo de la Difusividad térmica de los áridos	166
IV.8. Análisis de resultados	167
IV.9. Referencias	170



Índice de Figuras

Figura IV.1. Temperatura experimento 22/02/16.....	128
Figura IV.2. Esquema de un perfil de temperatura.....	129
Figura IV.3. Perfil real de temperatura experimento 22/02/16.....	129
Figura IV.4. Temperatura experimento 07/03/16.....	131
Figura IV.5. Perfil real de temperatura experimento 07/03/16.....	131
Figura IV.6. Método de Integración de valores del termoflujómetro.....	135
Figura IV.7. Temperatura Experimento carga 1h.....	136
Figura IV.8. Flujo de calor Experimento carga 1h.....	137
Figura IV.9. Temperatura Experimento carga 2h.....	138
Figura IV.10. Flujo de calor Experimento carga 2h.....	139
Figura IV.11. Temperatura Experimento carga 4h.....	140
Figura IV.12. Flujo de calor Experimento carga 4h.....	141
Figura IV.13. Evolución Temperatura Experimento 1 Hormigón.....	142
Figura IV.14. Evolución Flujo de calor Experimento 1 Hormigón.....	143
Figura IV.15. Evolución Temperatura Experimento 2 Hormigón.....	144
Figura IV.16. Evolución Flujo de Calor Experimento 2 Hormigón.....	145
Figura IV.17. Temperatura experimento 02/06/16.....	147
Figura IV.18. Perfil real de temperatura experimento 02/06/16.....	147
Figura IV.19. Temperatura experimento 08/06/16.....	149
Figura IV.20. Perfil real de temperatura experimento 08/06/16.....	149
Figura IV.21. Temperatura Experimento carga 1h.....	152
Figura IV.22. Flujo de calor Experimento carga 1h.....	153
Figura IV.23. Temperatura Experimento carga 2h.....	154
Figura IV.24. Flujo de calor Experimento carga 2h.....	155
Figura IV.25. Temperatura Experimento carga 3h.....	156
Figura IV.26. Flujo de calor Experimento carga 3h.....	157
Figura IV.27. Temperatura Experimento carga 4h.....	158
Figura IV.28. Flujo de calor Experimento carga 4h.....	159
Figura IV.29. Evolución Temperatura Experimento 1 Áridos.....	160
Figura IV.30. Evolución Flujo de Calor Experimento 1 Áridos.....	161
Figura IV.31. Evolución Temperatura Experimento 2 Áridos.....	163
Figura IV.32. Evolución Flujo de Calor Experimento 1 Áridos.....	164



IV.1. Introducción

En este capítulo se van a realizar una serie de experimentos con el fin de analizar el comportamiento térmico de diferentes materiales. Para empezar, se van a calcular las conductividades térmicas en función del flujo de calor y los perfiles de temperaturas obtenidos en las losas.

Otro de los objetivos de este capítulo es comparar la energía disipada por la losa con la disipada por el hilo eléctrico situado en la base de cada losa. En este apartado se han realizado una serie de experimentos cortos basados en calentar la losa una, dos y cuatro horas y dejar enfriar la losa hasta llegar a la temperatura inicial de cada experimento. También se han descrito para cada material, dos experimentos largos con el objetivo claro de aumentar la temperatura hasta alcanzar un régimen estacionario.

Para finalizar los cálculos se han calculado las difusividades térmicas de cada material para posteriormente analizar los resultados.

Por último se ha realizado un breve estudio comparativo entre ambos materiales, teniendo en cuenta todos los datos extraídos de los experimentos descritos en esta introducción.

IV.2. Cálculo de la conductividad térmica K del hormigón

El cálculo de este parámetro se va a basar en los datos que ha facilitado el termoflujómetro en el experimento de Carga 22-02-16 una vez alcanzado el régimen estacionario en la losa (Figura IV.1).

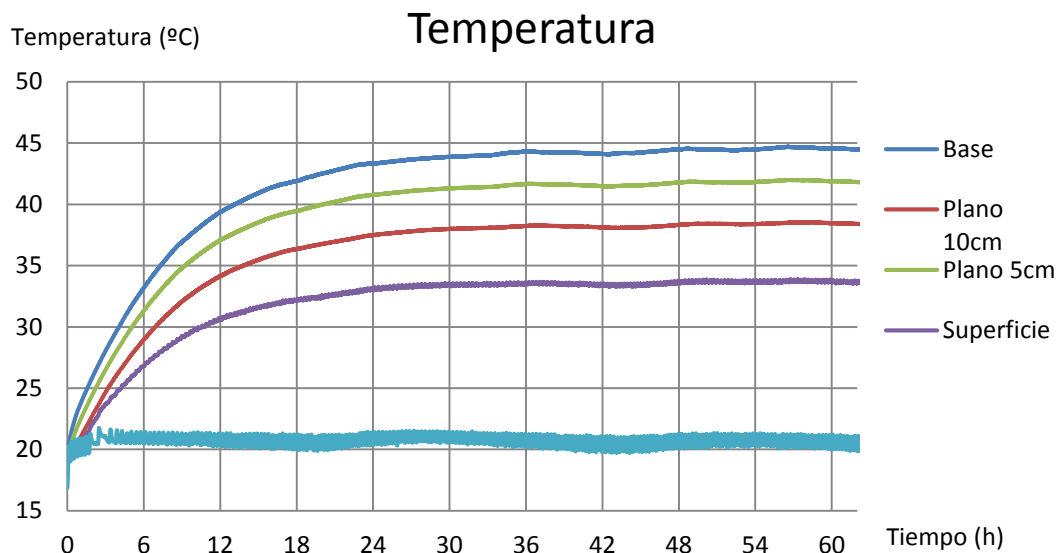


Figura IV.1. Temperatura experimento 22/02/16

Aplicando la ecuación del flujo de calor sobre una placa plana de un determinado espesor (Eq IV.1) se podrá calcular el dato buscado a partir de los diferentes perfiles de temperatura (Figura IV.2):

$$\dot{Q} = \frac{K \cdot A \cdot \Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Eq IV.1})$$

Siendo:

\dot{Q} Flujo de calor que atraviesa el termoflujómetro (W)

K Conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$)

A Área de la superficie de la cual se mide el flujo (m^2)

ΔT Incremento de temperatura entre extremos del intervalo a considerar (K ó $^{\circ}C$)

Δx Espesor del intervalo a considerar (m)

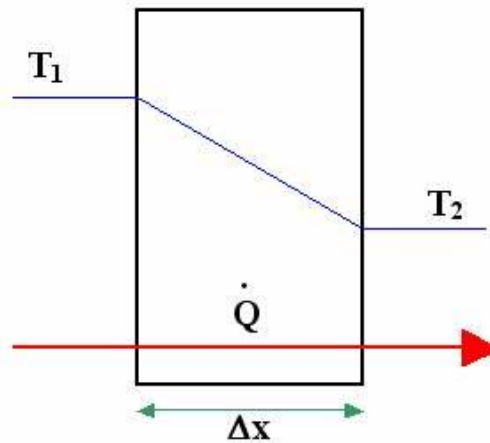


Figura IV.2. Esquema de un perfil de temperatura

Para el cálculo se van a tomar los datos del experimento una vez alcanzado el régimen estacionario extrayendo un promedio de los datos de la figura IV.1 (Figura IV.3). Hay que tener en cuenta que el termoflujómetro va a proporcionar datos en unidades de \dot{Q}/A .

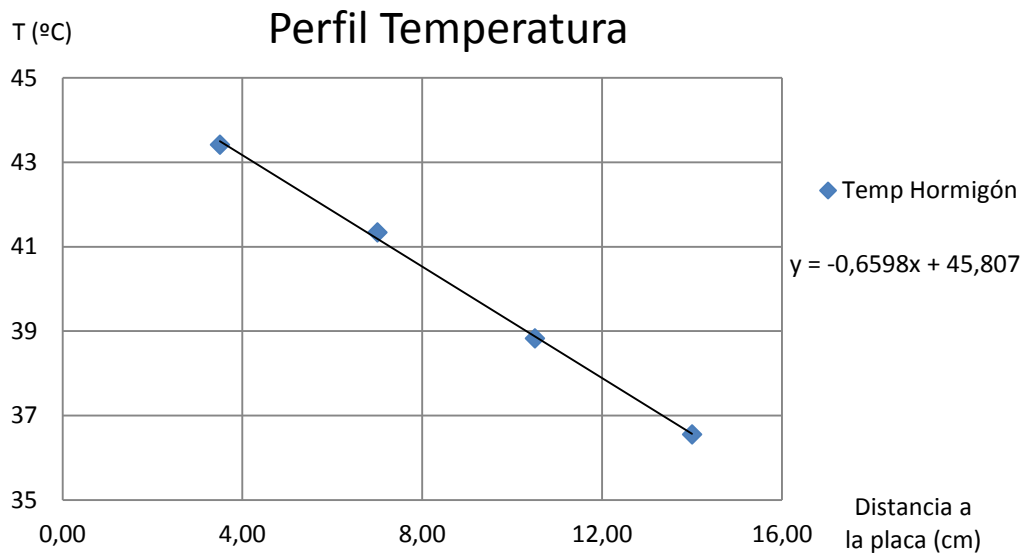


Figura IV.3. Perfil real de temperatura experimento 22/02/16

Como se puede observar el perfil de temperaturas es lineal. Por tanto, con el promedio del flujo de calor obtenido directamente del termoflujómetro en el mismo promedio de tiempo va a permitir calcular la conductividad.



El dato obtenido del termoflujómetro es:

$$\dot{Q}/A = 134,97 \text{ W/m}^2$$

Por tanto, mediante la ecuación (Eq IV.1) es posible calcular:

$$134,97 = \frac{K \cdot (43,41 - 36,55)}{10,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 2,06 \text{ W/mK}$$

Se puede aplicar esta misma ecuación (Eq IV.1) para diferentes intervalos de Δx :

Intervalo 1:

$$134,97 = \frac{K \cdot (38,83 - 36,55)}{3,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 2,07 \text{ W/mK}$$

Intervalo 2:

$$134,97 = \frac{K \cdot (41,34 - 38,83)}{3,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 1,88 \text{ W/mK}$$

Intervalo 3:

$$134,97 = \frac{K \cdot (43,41 - 41,34)}{3,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 2,28 \text{ W/mK}$$

Si realizamos la media de estas conductividades se obtendrá la calculada en el primer caso cuyo valor es:

$$K = 2,06 \text{ W/mK}$$

Para obtener una mayor rigurosidad se van a realizar todas las operaciones anteriores, pero para otro experimento, así se comprobará si el resultado recientemente calculado es correcto. El experimento del cual se van a tomar los datos es "Carga 07-03-16" (Figura IV.4). También se ha representado el perfil de temperaturas (Figura IV.5).

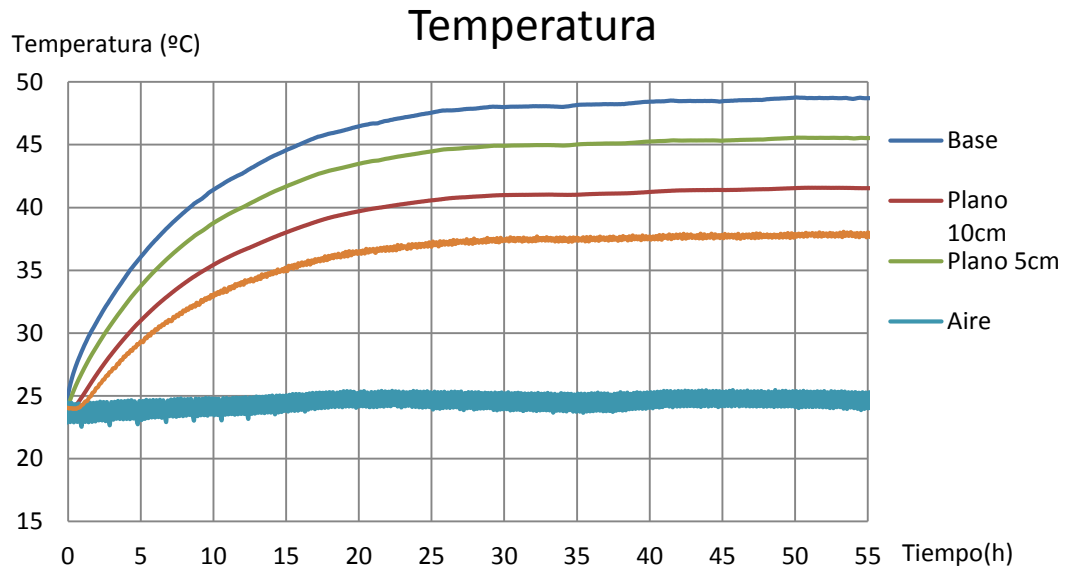


Figura IV.4. Temperatura experimento 07/03/16

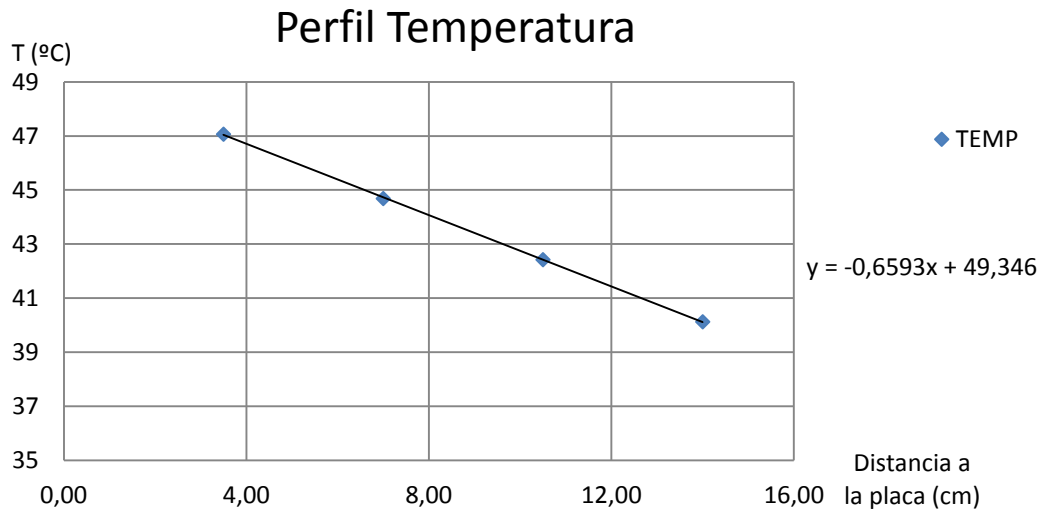


Figura IV.5. Perfil real de temperatura experimento 07/03/16

En régimen estacionario el calor disipado por la losa tiene un valor medio de:

$$\dot{Q}/A = 134,4 \text{ W/m}^2$$



Por tanto, según la ecuación (Eq IV.1):

$$134,4 = \frac{K \cdot (47,07 - 40,13)}{10,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 2,04 \text{ W/mK}$$

Se puede aplicar esta misma ecuación (Eq IV.1) para diferentes intervalos de Δx :

Intervalo 1:

$$134,4 = \frac{K \cdot (47,07 - 44,69)}{3,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 1,98 \text{ W/mK}$$

Intervalo 2:

$$134,4 = \frac{K \cdot (44,69 - 42,42)}{3,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 2,07 \text{ W/mK}$$

Intervalo 3:

$$134,4 = \frac{K \cdot (42,42 - 40,13)}{3,5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 2,05 \text{ W/mK}$$

La media de los 3 intervalos se corresponde con la primera conductividad calculada que era:

$$K = 2,04 \text{ W/mK}$$

Si calculamos el error cometido de un experimento a otro vemos que el error es inferior al 1% por tanto vamos a asumir para todos los cálculos que la conductividad del hormigón tiene un valor de 2.06.

$$K = 2,06 \text{ W/mK}$$



IV.3. Comprobación del flujo de calor a través de la losa de hormigón de 150mm

EL objetivo primero de este apartado es comprobar si la energía aportada por el hilo es la misma que la disipada por la losa. Se va a realizar esta comprobación para 3 experimentos sucesivos de calentamiento corto y enfriamiento y 2 experimentos largos de calentamiento. Los experimentos que se van a utilizar son:

- IV.3.1. Calentamiento 1h y Enfriamiento hasta estabilizar
- IV.3.2. Calentamiento 2h y Enfriamiento hasta estabilizar
- IV.3.3. Calentamiento 4h y Enfriamiento hasta estabilizar
- IV.3.4. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario
- IV.3.5. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario

El objetivo va a ser comprobar que el calor aportado por el hilo conductor es el mismo que el disipado por la losa. En nuestro caso la potencia que genera el hilo conductor se calcula mediante la ecuación (Eq IV.2):

$$P = I \cdot \Delta V \quad (\text{Eq IV.2})$$

Siendo:

P Potencia disipada (W)

I Intensidad de corriente (A)

ΔV Voltaje (V)

Los datos son:

$$I = 0.73A \quad \Delta V = 220V$$

$$P = 0.73A \cdot 220V \rightarrow P = 160W$$

Una vez calculado este valor se pueden comprobar los experimentos.

El primer paso a realizar en cada caso va a ser el cálculo del calor que el hilo conductor va a aportar a la losa. Para realizarlo vale con saber el tiempo que el cable ha aportado calor a la losa, este dato viene recogido en el título de cada experimento. La fórmula a aplicar en este caso es (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t \quad (\text{Eq IV.3})$$



Siendo:

E Energía disipada (J)

P Calor disipado (W)

t Tiempo (s)

El segundo paso consiste en comprobar que esta energía es la misma que se disipa a través de la losa. Este cálculo se va a realizar de dos formas distintas, pero partiendo de la misma ecuación que es la (Eq IV.4). En este caso se tiene en cuenta la energía acumulada (1° Término) y la energía disipada (2° Término).

$$E = \sum_0^N (M \cdot C_p \cdot \Delta T) + \int_0^{T1} Q \cdot dt \quad (\text{Eq IV.4})$$

Siendo:

E Energía disipada (J)

M Masa de hormigón (Kg)

C_p Calor específico del hormigón ($J/Kg \cdot K$)

ΔT Incremento de temperatura entre 0 y T1 (K)

M Masa de hormigón (Kg)

Q Calor disipado (W)

dt Diferencial de Tiempo (s)

$T1$ Tiempo base (s)

N Número de intervalos en que se divide la losa (*adimensional*)

- La primera forma consiste en aplicar la fórmula tal cual está descrita en el párrafo anterior para los experimentos largos de calentamiento hasta alcanzar el régimen estacionario. Donde el ΔT es la diferencia de temperaturas entre el punto inicial y el final de las gráficas.



- La segunda forma consiste en la aplicación de la fórmula anterior pero para un intervalo donde coinciden las temperaturas iniciales y finales ($\Delta T = 0$). En este caso, la fórmula se reduce al segundo término y será la siguiente (Eq IV.5). Es la fórmula que se va a utilizar para los experimentos cortos.

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \quad (\text{Eq IV.5})$$

Siendo:

E Energía disipada (J)

Q Calor disipado (W)

dt Diferencial de Tiempo (s)

Tf Tiempo que dura el experimento (s)

En cuanto al método de integración de ambos casos, la forma en que se van a realizar los cálculos sería la suma de pequeñas superficies de ancho igual al intervalo de tiempo que tarda en tomar datos el adquiredor. Esta imagen representa la idea (Figura IV.6).

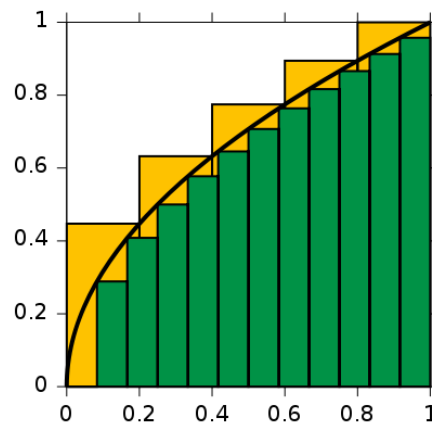


Figura IV.6. Método de Integración de valores del termoflujómetro

Por tanto, el valor de resultado final va a contener cierto error debido a los espacios que no se van a tener en cuenta y a que los intervalos de tiempo sin tomar datos son largos.

IV.3.1. Calentamiento 1h y enfriamiento hasta estabilizar

Primero se van a mostrar dos gráficos, uno referente a la variación de temperatura (Figura IV.7) y otro referente a la variación (Figura IV.8) del flujo de calor, ambos referenciados respecto al tiempo. La representación se va a hacer en los intervalos necesarios para que la temperatura inicial y final de cada gráfico coincidan.

La temperatura ambiente es de 17°C. En este caso la regulación de esta temperatura se realiza mediante un ventilador que aumenta la temperatura al disminuir esta regularmente. Como se puede observar, al final, la temperatura tarda más en disminuir, lo cual ha influido en el tiempo de estabilización de la losa haciendo que tarde más tiempo de lo normal.

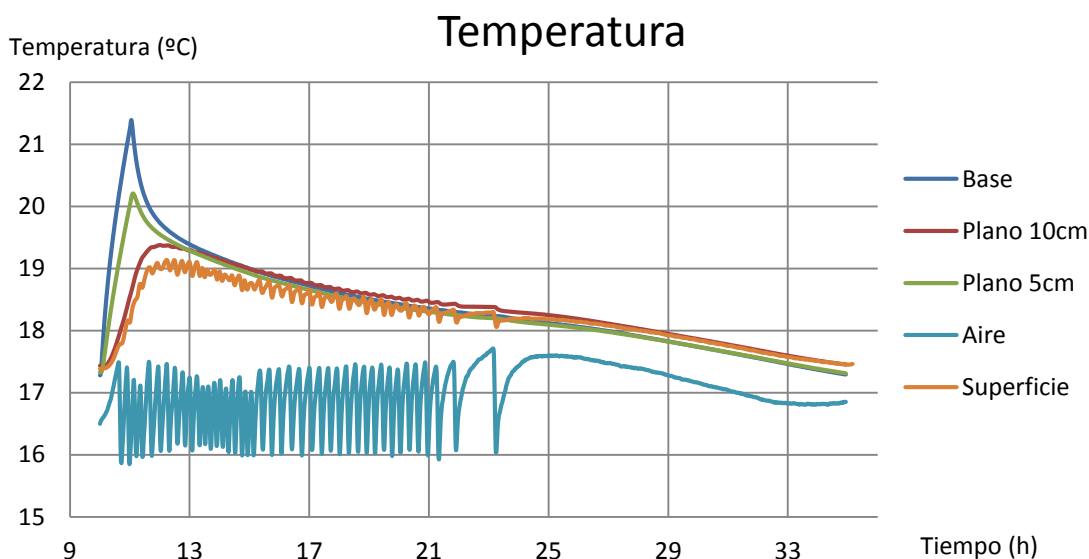


Figura IV.7. Temperatura Experimento carga 1h

La forma de regular la temperatura ha generado una gráfica de flujo de calor muy irregular con muchos picos y con un extraño incremento al final de esta que no se correspondería con la realidad (donde lo normal sería que disminuyera).

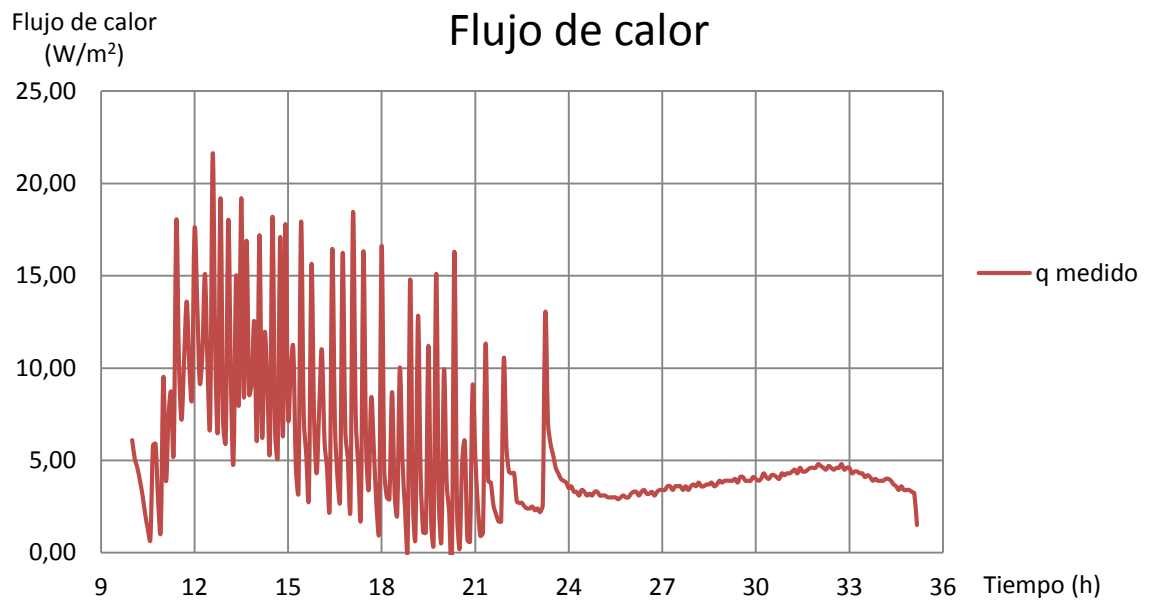


Figura IV.8. Flujo de calor Experimento carga 1h

Con los datos proporcionados por estos diagramas se pueden empezar a desarrollar los resultados. Se va a empezar calculando la energía disipada por el hilo conductor durante un tiempo equivalente a 1h (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 1 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 576000 \text{ J}$$

Para calcular la energía disipada por la losa se va a aplicar la segunda forma de comprobación (Eq IV.5):

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \rightarrow E = 502140 \text{ J}$$

El análisis de datos se va a tratar en un apartado al final del capítulo.

IV.3.2. Calentamiento 2h y enfriamiento hasta estabilizar

De nuevo como en el primer experimento se van a mostrar dos gráficos, uno referente a la variación de temperatura (Figura IV.9) y otro referente a la variación del flujo de calor (Figura IV.10), ambos referenciados respecto al tiempo.

En este caso la temperatura media del aire ronda los 17°C de nuevo, y la forma de regulación es la misma que en el experimento anterior, de ahí que existan algunas fluctuaciones en la gráfica de la temperatura ambiente. Las temperaturas inicial y final coinciden en unos 18,5°C.

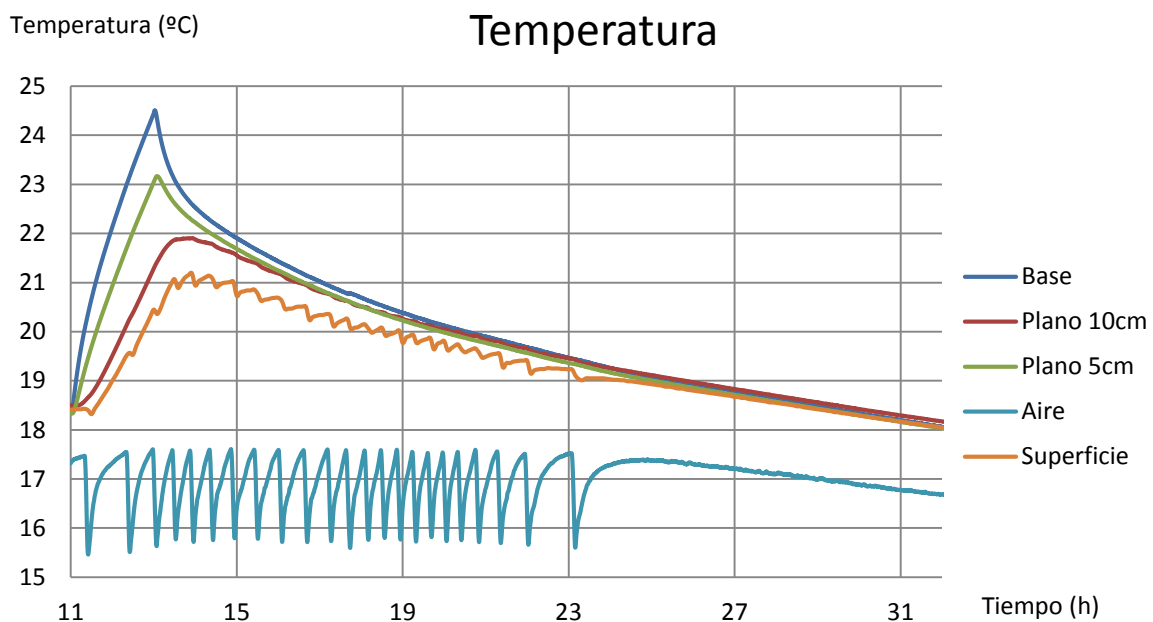


Figura IV.9. Temperatura Experimento carga 2h

La forma de regulación del aire también ha influido en la gráfica del flujo de calor proporcionando una gráfica muy irregular.

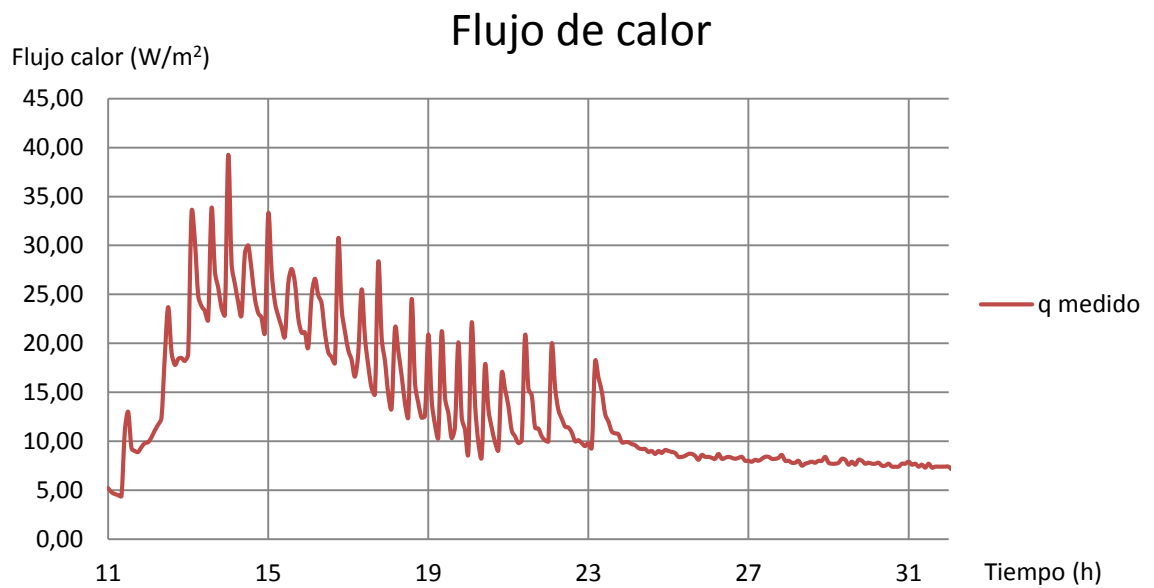


Figura IV.10. Flujo de calor Experimento carga 2h

Con los datos proporcionados por estos diagramas se pueden desarrollar los resultados. Se va a empezar calculando la energía disipada durante un tiempo equivalente a 2h (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \frac{J}{s} \cdot 2h \cdot 3600 \frac{s}{h} \rightarrow E = 1152000J$$

Para calcular la energía disipada por la losa se va a aplicar la segunda forma de comprobación (Eq IV.5):

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \rightarrow E = 1002600J$$

Los análisis de datos se darán en el último apartado.

IV.3.3. Calentamiento 4h y enfriamiento hasta estabilizar

De nuevo, como en casos anteriores, aparecen dos gráficas como las anteriores, que expresan temperatura (Figura IV.11) y flujo de calor (Figura IV.12) en función del tiempo.

La temperatura del aire va a ser de 17°C y la inicial y final de la losa de unos 18°C. Al contrario que en casos anteriores, la estabilización de la temperatura exterior ha sido más regular, proporcionando así mayor continuidad en las gráficas.

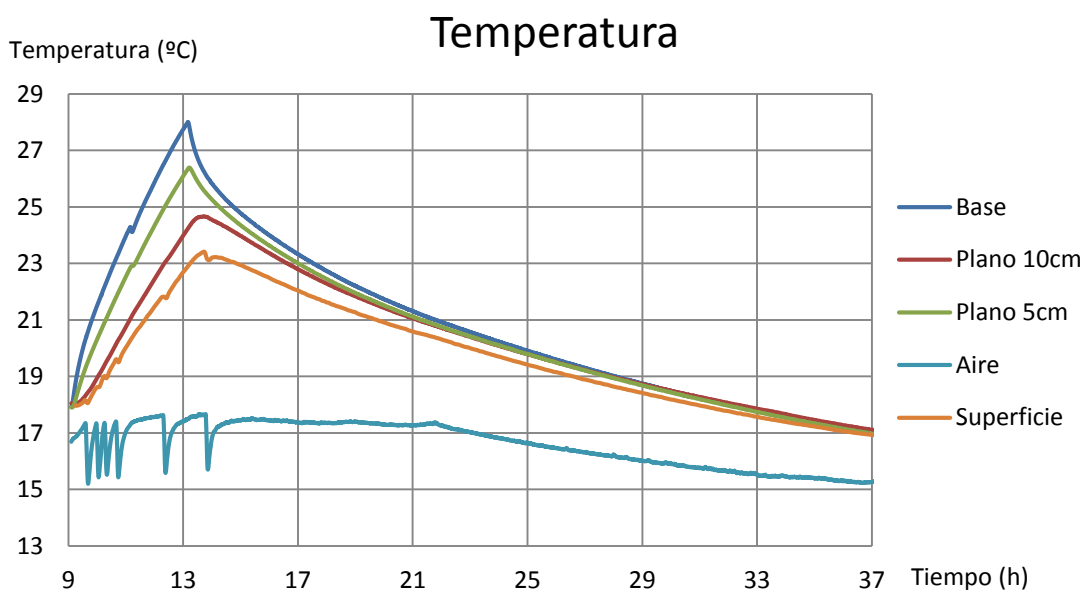


Figura IV.11. Temperatura Experimento carga 4h

En cuanto al flujo de calor este también es más regular que en el resto de experimentos y su gráfica presenta un mejor aspecto.



Flujo de calor

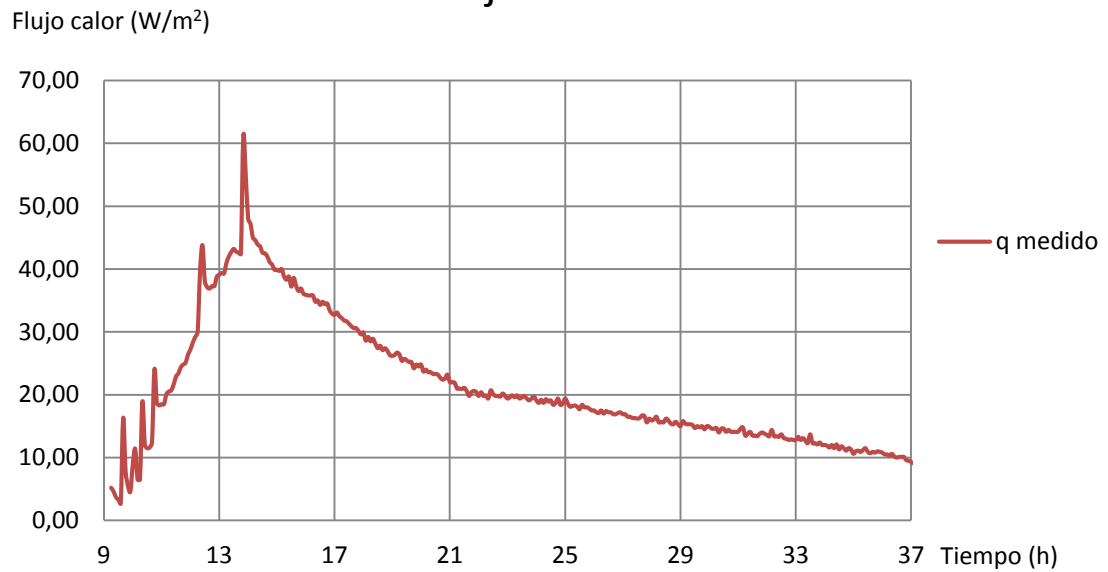


Figura IV.12. Flujo de calor Experimento carga 4h

En este caso la energía aportada por el hilo cambia al estar más tiempo y se va a calcular mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 4 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 2304000 \text{ J}$$

Para calcular la energía disipada por la losa se va a aplicar la segunda forma de comprobación (Eq IV.5):

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \rightarrow E = 1984320 \text{ J}$$

Como se ha explicado anteriormente, el análisis de datos se va a dar en el apartado final.

IV.3.4. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario

Se va a realizar esta comprobación para el experimento de calentamiento largo del día 07-03-16, y se van a representar las gráficas de la temperatura (Figura IV.13) y el flujo de calor (Figura IV.14) en función del tiempo.

En este experimento la temperatura del aire es de 24°C y la forma de regulación no ha variado, a pesar de que no sea tan apreciable como en las gráficas anteriores debido al tamaño del gráfico. Se ha dejado calentar la losa hasta alcanzar una temperatura constante a lo largo del tiempo (Régimen estacionario).

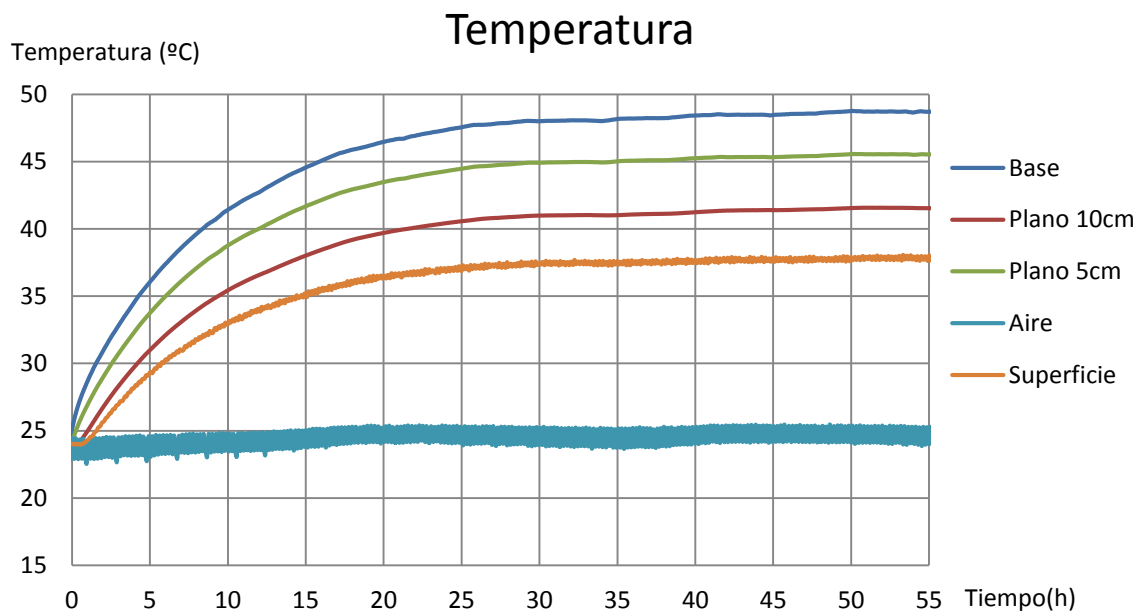


Figura IV.13. Evolución Temperatura Experimento 1 Hormigón

El flujo de calor al ser proporcional a la diferencia de temperaturas también se ha estabilizado en un valor cercano a los 130-140 W/m². Aunque también fluctúan esos valores debido a la regulación de ña temperatura ambiente.

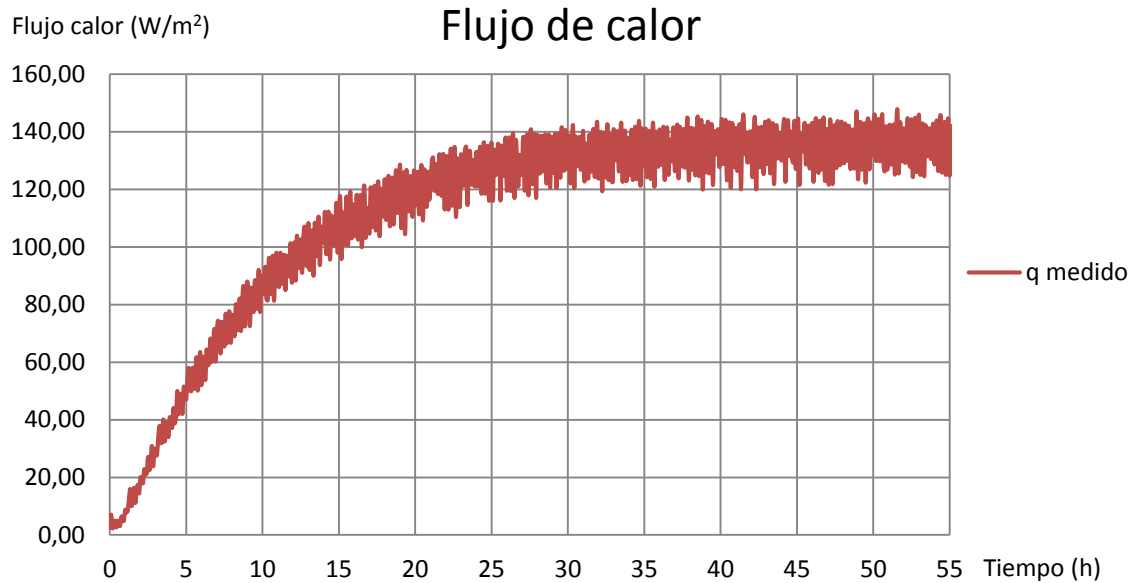


Figura IV.14. Evolución Flujo de calor Experimento 1 Hormigón

Con los datos proporcionados por estos diagramas se pueden calcular los resultados. Se va a empezar calculando la energía disipada por el hilo conductor durante un tiempo equivalente a 55h (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 55 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 31680000 \text{ J}$$

Mediante la aplicación de la primera forma de comprobación (Eq IV.4) y, teniendo en cuenta la densidad del hormigón y su calor específico, se puede calcular la energía disipada por la losa:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{hormigón}} &= 2276 \text{ Kg/m}^3 \quad C_p = 1000 \text{ J/Kg} \cdot \text{K} \\ E &= \sum_0^N (M \cdot C_p \cdot \Delta T) + \int_0^{T1} Q \cdot dt = \\ &= \left(0,05 \text{ m}^3 \cdot 2276 \text{ Kg/m}^3 \cdot 1000 \text{ J/Kg} \cdot \text{K} \right) \cdot \\ &\quad \cdot \left[\left(\frac{48,72 + 45,6}{2} - 24 \right) + \left(\frac{45,6 + 41,54}{2} - 24 \right) + \left(\frac{41,54 + 39,24}{2} - 24 \right) \right] \text{ K} + 22173390 \text{ J} \rightarrow E = 28844346 \text{ J} \end{aligned}$$

IV.3.5. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario

Se va a realizar esta comprobación para el experimento de calentamiento largo del día 22-02-16, y se van a representar las gráficas de la temperatura (Figura IV.15) y el flujo de calor (Figura IV.16) en función del tiempo.

En este experimento la temperatura ambiente se ha reducido hasta los 21°C y se ha dejado que la temperatura de la losa se estabilice a lo largo de tiempo hasta alcanzar el régimen estacionario.

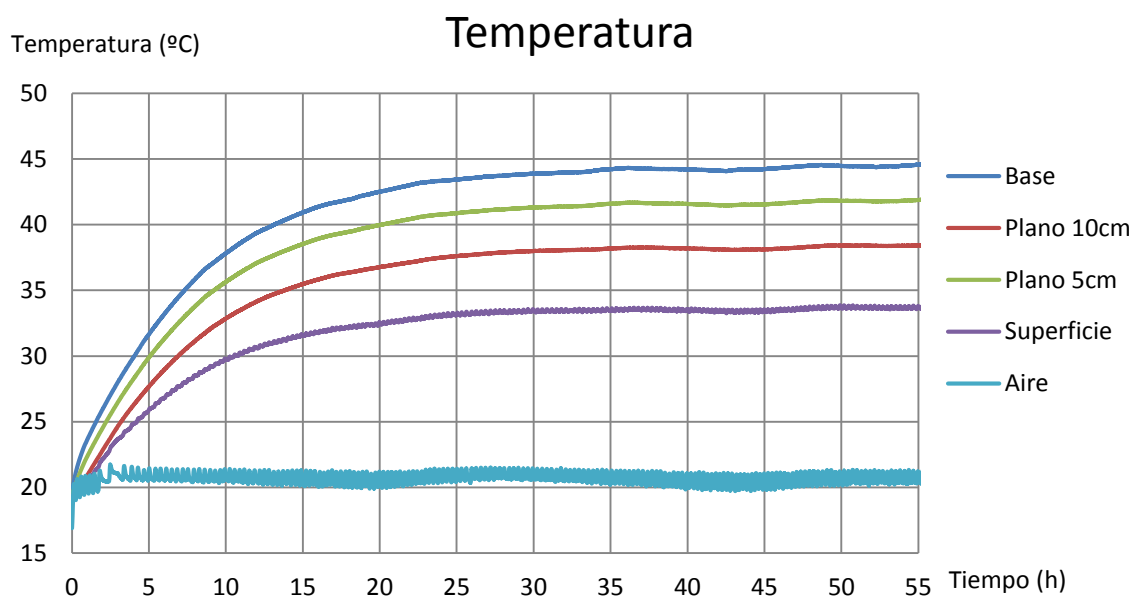


Figura IV.15. Evolución Temperatura Experimento 2 Hormigón

Al igual que en el caso anterior el flujo de calor se estabiliza en torno a los 130-140 W/m². Las irregularidades y los picos que aparecen en la gráfica se deben principalmente a la forma de controlar la temperatura ambiente.

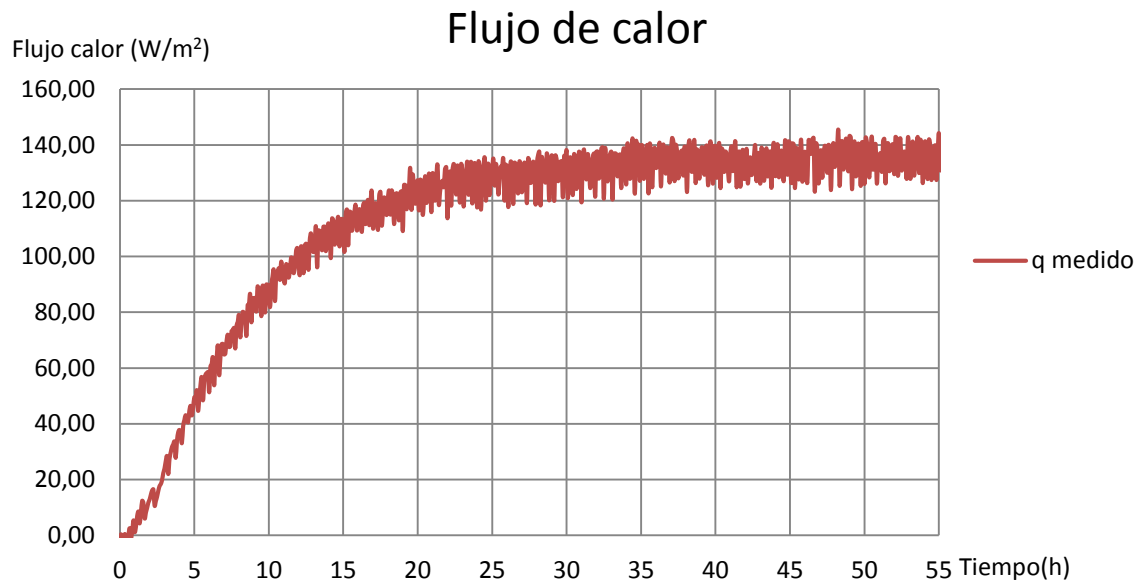


Figura IV.16. Evolución Flujo de Calor Experimento 2 Hormigón

Con los datos proporcionados por estos diagramas se pueden calcular los resultados. Se va a empezar calculando la energía disipada por el hilo conductor durante un tiempo equivalente a 62h mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \frac{J}{s} \cdot 55h \cdot 3600 \frac{s}{h} \rightarrow E = 31680000J$$

Mediante la aplicación de la primera forma de comprobación (Eq IV.4) y, teniendo en cuenta la densidad del hormigón y su calor específico se puede calcular la energía disipada por la losa:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{hormigón}} &= 2276 \frac{Kg}{m^3} \quad C_p = 1000 \frac{J}{Kg \cdot K} \\ E &= \sum_0^N (M \cdot C_p \cdot \Delta T) + \int_0^{T1} Q \cdot dt = \\ &= \left(0,05m^3 \cdot 2276 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1000 \frac{J}{Kg \cdot K} \right) \cdot \\ &\quad \cdot \left[\left(\frac{44,5 + 41,84}{2} - 19,5 \right) + \left(\frac{41,84 + 38,4}{2} - 19,5 \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{38,4 + 34,6}{2} - 19,5 \right) \right] K + 22306590J \rightarrow E = 29180830J \end{aligned}$$



IV.4. Cálculo de la difusividad térmica del hormigón

Se puede definir la difusividad térmica como el índice que expresa la velocidad de cambio en un material hasta alcanzar el equilibrio térmico. Para el cálculo de esta se va a utilizar la siguiente ecuación (Eq IV.6):

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (\text{Eq IV.6})$$

Siendo:

α Difusividad térmica (m^2/s)

K Conductividad térmica ($W/m \cdot K$)

ρ Densidad (Kg/m^3)

C_p Calor específico ($J/Kg \cdot K$)

En el caso del hormigón si se aplica esta fórmula (Eq IV.6) se obtiene:

$$\alpha = \frac{2,06 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{2276 \text{ Kg/m}^3 \cdot 1000 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}} = 9,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$



IV.5. Cálculo de la conductividad térmica K de los áridos

Para el cálculo se van a tomar los datos del experimento “Carga 02-06-16” una vez alcanzado el régimen estacionario (Figura IV.17) para tener una temperatura estable en los diferentes planos de la losa.

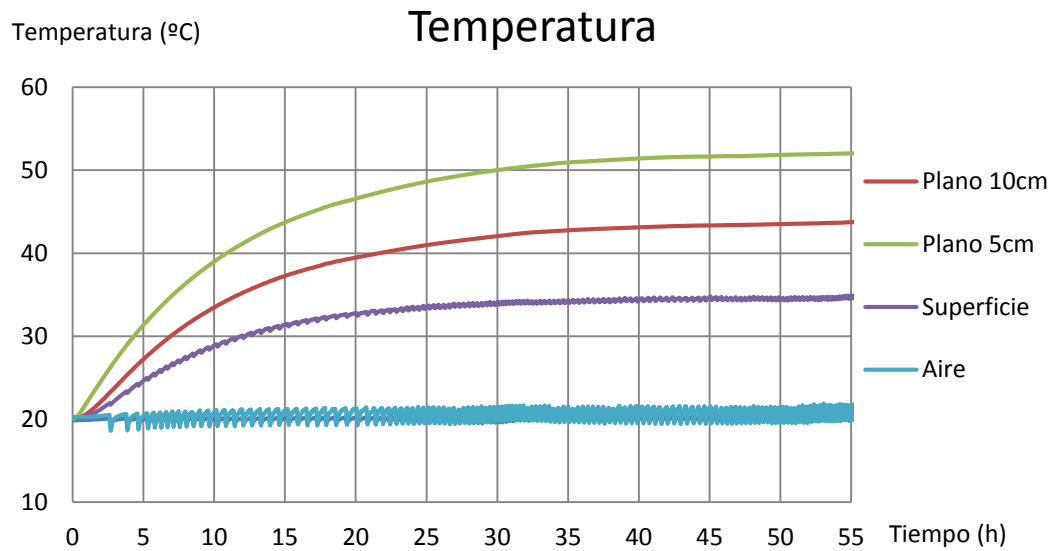


Figura IV.17. Temperatura experimento 02/06/16

Hay que tener en cuenta que el termoflujómetro va a proporcionar datos en unidades de \dot{Q}/A . El perfil de temperaturas será (Figura IV.18).

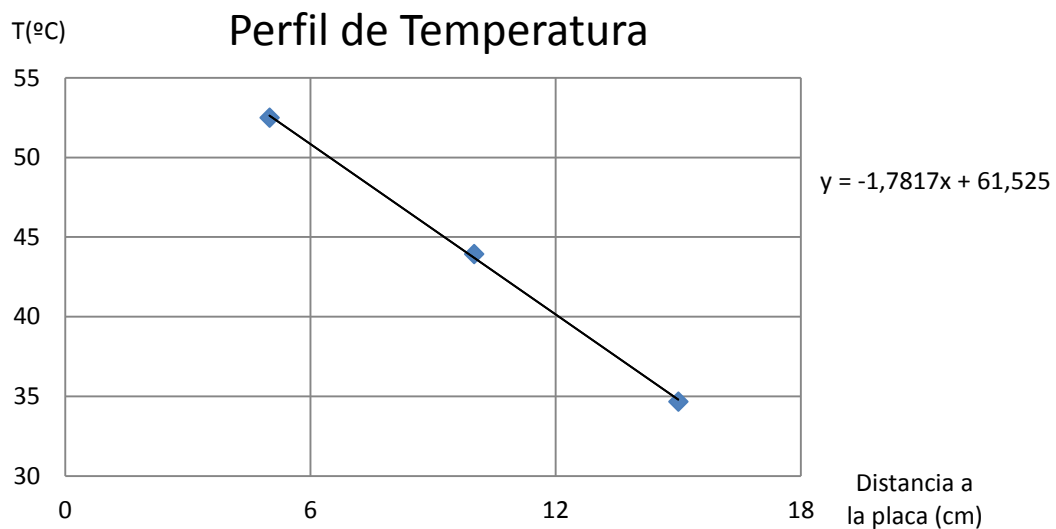


Figura IV.18. Perfil real de temperatura experimento 02/06/16



El dato obtenido del termoflujómetro es:

$$\dot{Q}/A = 125,93 \text{ W/m}^2$$

Por tanto, mediante la ecuación (Eq IV.1) es posible calcular:

$$125,93 = \frac{K \cdot (52,5 - 34,68)}{10 \cdot 10^{-2}} \quad K = 0,706 \text{ W/mK}$$

Se puede aplicar esta misma ecuación (Eq IV.1) para diferentes intervalos de Δx :

Intervalo 1:

$$125,93 = \frac{K \cdot (52,5 - 43,94)}{5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 0,735 \text{ W/mK}$$

Intervalo 2:

$$125,93 = \frac{K \cdot (41,34 - 43,94)}{5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 0,689 \text{ W/mK}$$

Si realizamos la media de estas conductividades se obtendrá la conductividad calculada en el primer caso cuyo valor es:

$$K = 0,707 \text{ W/mK}$$

Para obtener una mayor rigurosidad se van a realizar todas las operaciones anteriores, pero para otro experimento, así se comprobará si el resultado recientemente calculado es correcto. El experimento del cual se van a tomar los datos es “Carga 08-06-16” (Figura IV.19). Posteriormente se ha representado gráficamente el perfil de temperaturas (Figura IV.20).

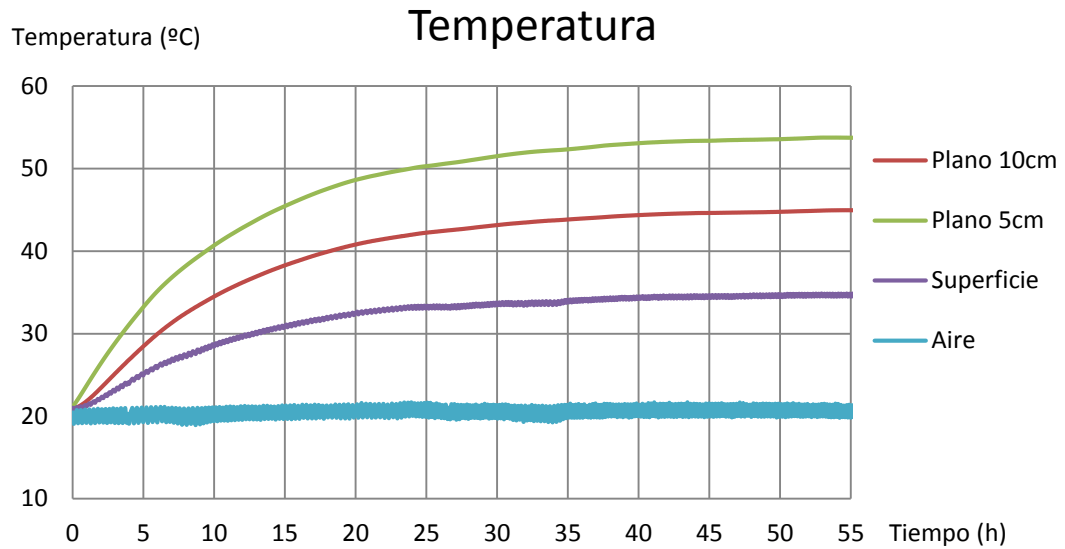


Figura IV.19. Temperatura experimento 08/06/16

El perfil de temperatura calculado con los datos de las temperaturas medias una vez alcanzado el régimen estacionario es el siguiente (Figura IV.20).

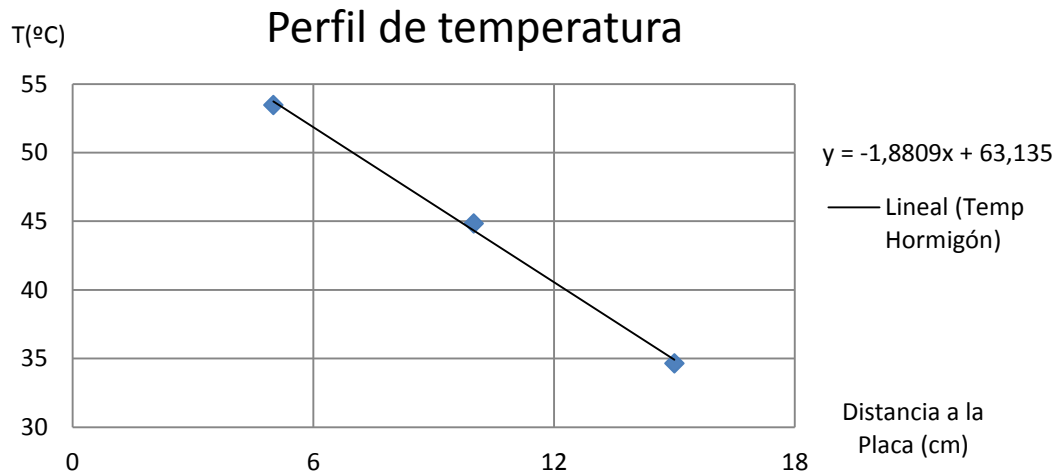


Figura IV.20. Perfil real de temperatura experimento 08/06/16

En régimen estacionario el calor disipado por la losa tiene un valor medio de:

$$\dot{Q}/A = 113,69 \text{ W/m}^2$$

Por tanto, según la ecuación (Eq IV.1):



$$113,69 = \frac{K \cdot (53,47 - 34,66)}{10 \cdot 10^{-2}} \quad K = 0,604 \text{ W/mK}$$

Se puede aplicar esta misma ecuación (Eq IV.1) para diferentes intervalos de Δx :

Intervalo 1:

$$113,69 = \frac{K \cdot (53,47 - 44,85)}{5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 0,659 \text{ W/mK}$$

Intervalo 2:

$$113,69 = \frac{K \cdot (44,85 - 34,66)}{5 \cdot 10^{-2}} \quad K = 0,558 \text{ W/mK}$$

La media de los 2 intervalos se corresponde con la primera conductividad calculada que era:

$$K = 0,607 \text{ W/mK}$$

Teniendo en cuenta los dos resultados obtenidos se puede afirmar que la conductividad térmica de este material estará comprendida entre 0.6 y 0.7 por tanto se va a tomar el siguiente valor de K:

$$K = 0,65 \text{ W/mK}$$

Según los datos obtenidos de [1, Miliarum, 2008] la conductividad térmica de la arena seca es de 0,58 y la de la arena mojada es de 1,13. Esta conductividad se encuentra muy cercana a la de la arena seca pero no llega exactamente a ese valor debido a alguna humedad residual que pueda permanecer. En conclusión, el resultado se encuentra dentro de los valores estimados.



IV.6. Comprobación del flujo de calor a través de la losa de áridos de 100mm

Se va a realizar, al igual que en el caso del hormigón, esta comprobación para 4 experimentos sucesivos de calentamiento corto y enfriamiento y 2 experimentos de calentamiento largo. Los experimentos que se van a utilizar son:

- IV.6.1. Calentamiento 1h y Enfriamiento hasta estabilizar
- IV.6.2. Calentamiento 2h y Enfriamiento hasta estabilizar
- IV.6.3. Calentamiento 3h y Enfriamiento hasta estabilizar
- IV.6.4. Calentamiento 4h y Enfriamiento hasta estabilizar
- IV.6.5. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario
- IV.6.6. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario

El objetivo va a ser comprobar que el calor aportado por el hilo conductor es el mismo que el disipado por la losa. De nuevo como en el caso anterior se va a utilizar la ecuación (Eq IV.2) para el cálculo de la potencia eléctrica:

$$P = I \cdot \Delta V \quad (\text{Eq IV.2})$$

En este caso para el cálculo de la energía disipada por el hilo conductor de nuevo se aplicará la ecuación siguiente (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t \quad (\text{Eq IV.3})$$

Como en el caso del hormigón, se ha de comprobar que esta energía es la misma que se disipa a través de la losa de áridos. Este cálculo se va a realizar otra vez de dos formas distintas. La primera forma como esta explicada anteriormente es la siguiente (Eq IV.4):

$$E = \sum_0^N (M \cdot C_p \cdot \Delta T) + \int_0^{T1} Q \cdot dt \quad (\text{Eq IV.4})$$

La segunda forma se corresponde con esta misma ecuación, pero para un $\Delta T = 0$ (Eq IV.5).

IV.6.1 Calentamiento 1h y enfriamiento hasta estabilizar

Aparecen dos gráficas como las vistas en el caso del hormigón, que expresan temperatura (Figura IV.21) y flujo de calor (Figura IV.22) en función del tiempo.

En este experimento se ha intentado mantener una temperatura ambiente cercana a los 20°C, como se ha especificado anteriormente, esta temperatura va a sufrir oscilaciones debido al mecanismo que se está utilizando para regularla. La baja conductividad de los áridos ha ocasionado que haya partes de la losa que se siguieran calentando una vez apagado el hilo conductor.

Por otro lado, que la temperatura de la losa nunca llegue a ser la del ambiente se va a deber a que esta recibe un flujo constante de radiación por parte de otros elementos de la sala, flujo que no se ha cuantificado para este trabajo.

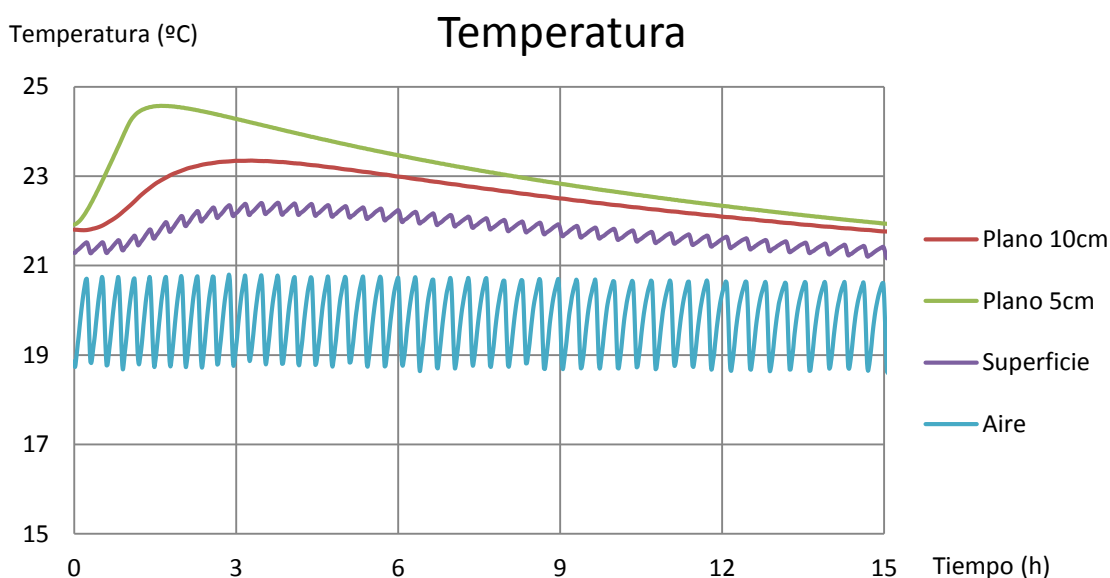


Figura IV.21. Temperatura Experimento carga 1h

Debido como se ha añadido antes al mecanismo de regulación de la temperatura ambiente, el flujo de calor va a tener el siguiente aspecto y va a contener muchas ondulaciones en su gráfico.

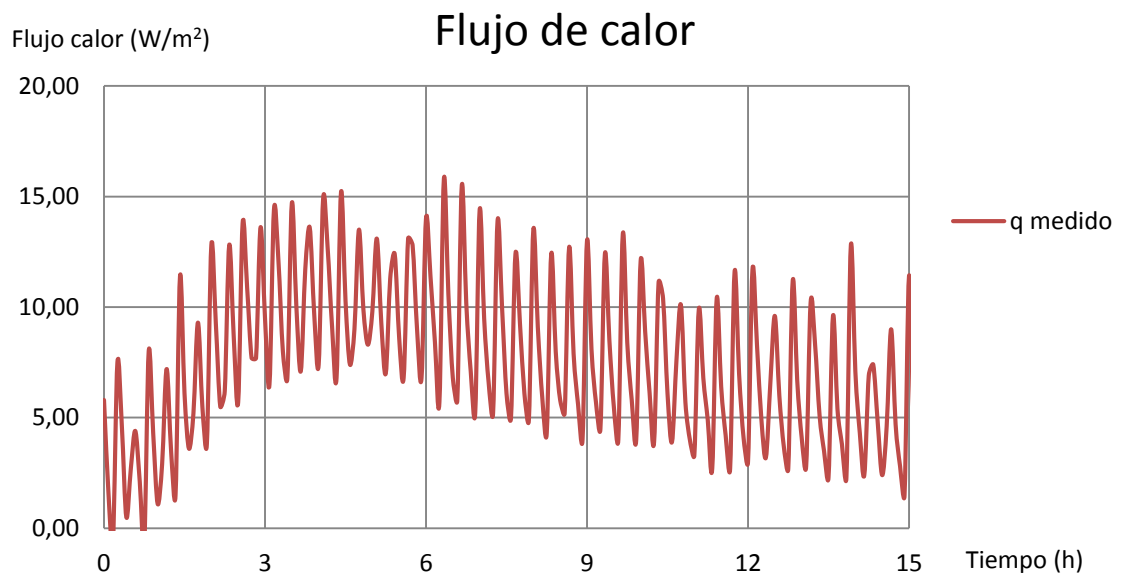


Figura IV.22. Flujo de calor Experimento carga 1h

En este caso la energía aportada por el hilo es la siguiente y se va a calcular mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 1 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 576000 \text{ J}$$

Para calcular la energía disipada por la losa de áridos se va a aplicar la segunda forma de comprobación (Eq IV.5):

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \rightarrow E = 411960 \text{ J}$$

El análisis de datos se llevará a cabo en el último apartado del capítulo.

IV.6.2. Calentamiento 2h y enfriamiento hasta estabilizar

Aparecen dos gráficas como las vistas en el caso anterior, que expresan temperatura (Figura IV.23) y flujo de calor (Figura IV.24) en función del tiempo.

Se ha logrado mantener una temperatura media cercana a los 20°C, aunque con algunas oscilaciones, lo cual ha generado irregularidades en algunas de las gráficas. Como se ha descrito antes, el calor por radiación evita que la temperatura final de la losa coincida con la del aire.

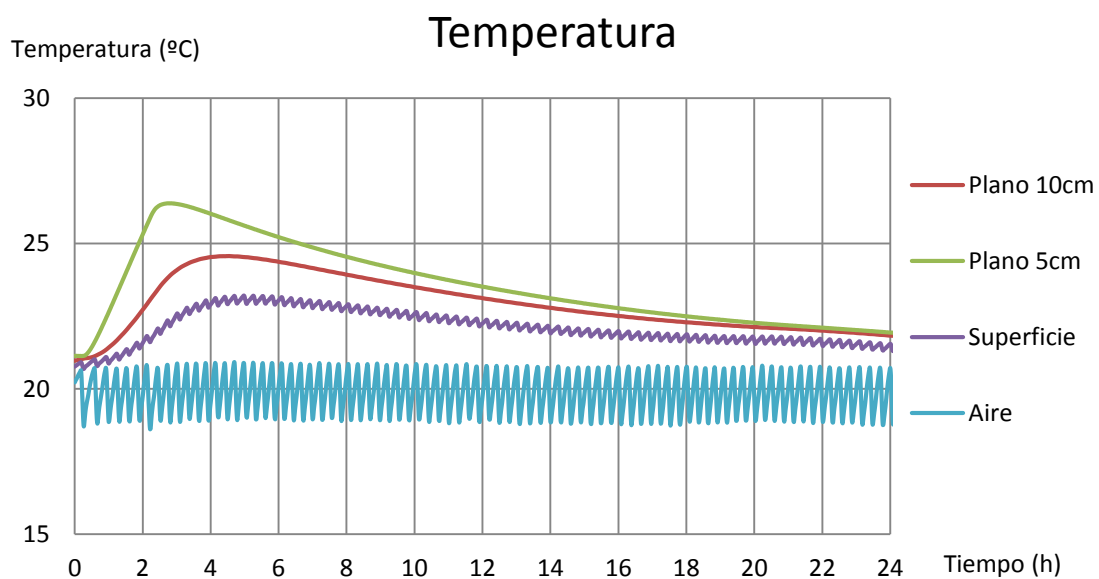


Figura IV.23. Temperatura Experimento carga 2h

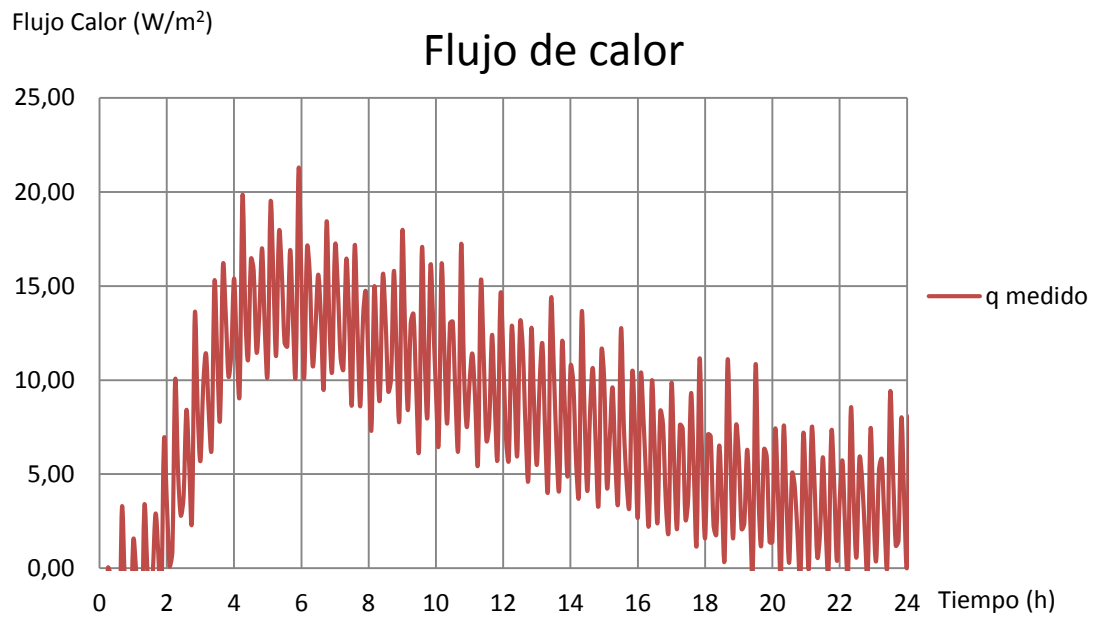


Figura IV.24. Flujo de calor Experimento carga 2h

En este caso la energía aportada por el hilo es la siguiente y se va a calcular mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 2 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 1152000 \text{ J}$$

Para calcular la energía disipada por la losa de áridos se va a aplicar la segunda forma de comprobación (Eq IV.5):

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \rightarrow E = 854250 \text{ J}$$

El análisis de datos se llevará a cabo en el último apartado del capítulo.

IV.6.3. Calentamiento 3 h y enfriamiento hasta estabilizar

En este experimento, (El cual solo se ha realizado para la losa de áridos y no para la de hormigón) aparecen dos gráficas como las vistas en el caso anterior, que expresan temperatura (Figura IV.25) y flujo de calor (Figura IV.26) en función del tiempo.

El experimento se ha realizado con una temperatura media del aire ambiente de unos 20°C y se ha dejado calentar la losa durante 3h. Se aprecia claramente como se ha calentado progresivamente hasta las 5h a pesar de haber apagado el hilo eléctrico.

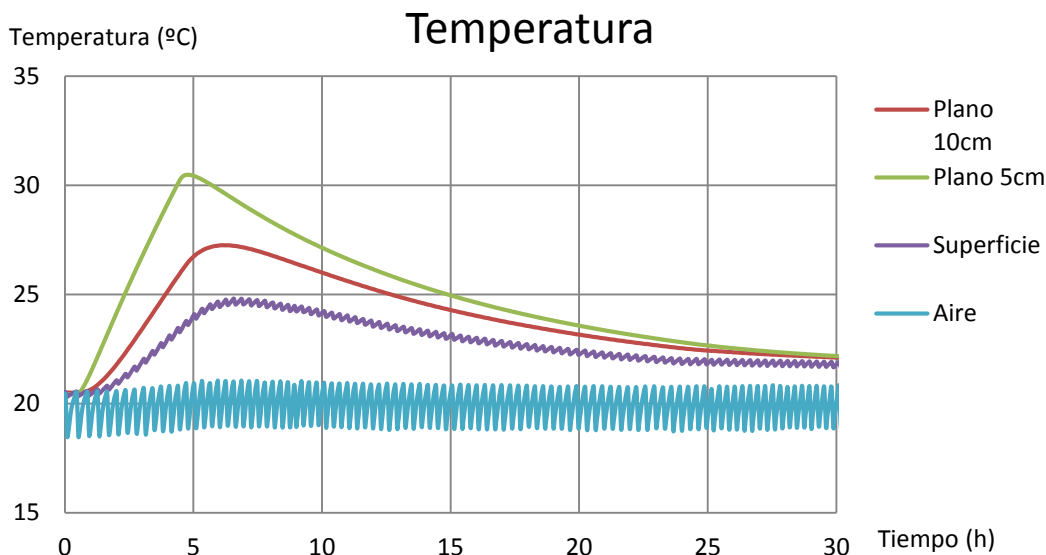


Figura IV.25. Temperatura Experimento carga 3h

En el gráfico del flujo de calor, se aprecia cómo se logra un pico de flujo de unos 25-30W/m² a las 7h del inicio del experimento. De nuevo, la forma de regular la temperatura ambiente ha generado irregularidades en la gráfica.

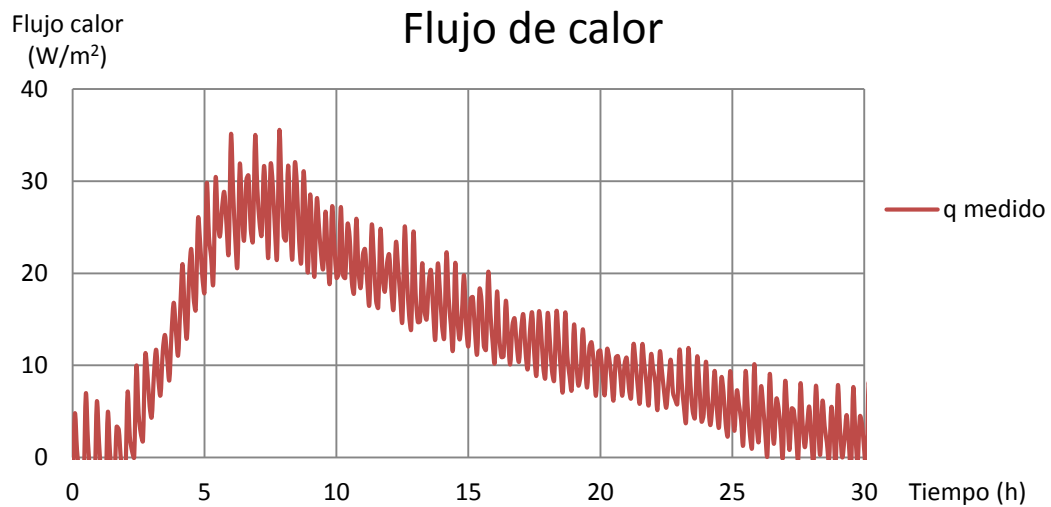


Figura IV.26. Flujo de calor Experimento carga 3h

En este caso la energía aportada por el hilo es la siguiente y se va a calcular mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 4 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 1728000 \text{ J}$$

Para calcular la energía disipada por la losa de áridos se va a aplicar la segunda forma de comprobación (Eq IV.5):

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \rightarrow E = 1360110 \text{ J}$$

El análisis de datos se llevará a cabo en el último apartado del capítulo.

IV.6.4. Calentamiento 4 h y enfriamiento hasta estabilizar

Aparecen dos gráficas como las vistas en el caso anterior, que expresan temperatura (Figura IV.27) y flujo de calor (Figura IV.28) en función del tiempo.

En este experimento se ha intentado mantener una temperatura ambiente cercana a los 20°C, como se ha especificado anteriormente, esta temperatura va a sufrir oscilaciones debido al mecanismo que se está utilizando para regularla. La baja conductividad de los áridos ha ocasionado que haya partes de la losa que se siguieran calentando una vez apagado el hilo conductor.

Por otro lado, que la temperatura de la losa nunca llegue a ser la del ambiente se va a deber a que esta recibe un flujo constante de radiación por parte de otros elementos de la sala, flujo que no se ha cuantificado para este trabajo.

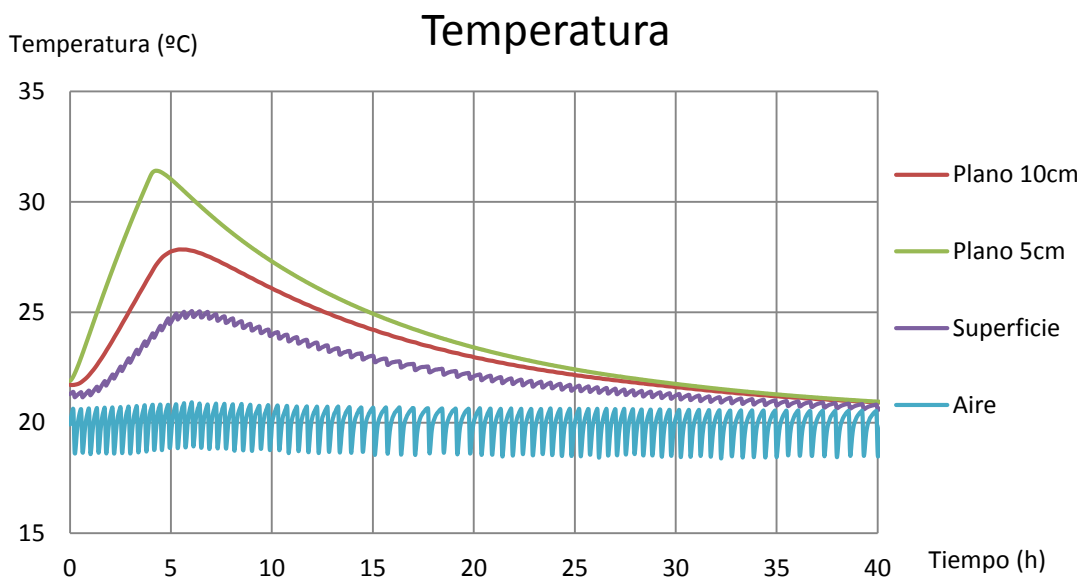


Figura IV.27. Temperatura Experimento carga 4h

En el gráfico del flujo de calor, se aprecia cómo se logra un pico de flujo de unos 30-35W/m² a las 7h del inicio del experimento. De nuevo, la forma de regular la temperatura ambiente ha generado irregularidades en la gráfica.

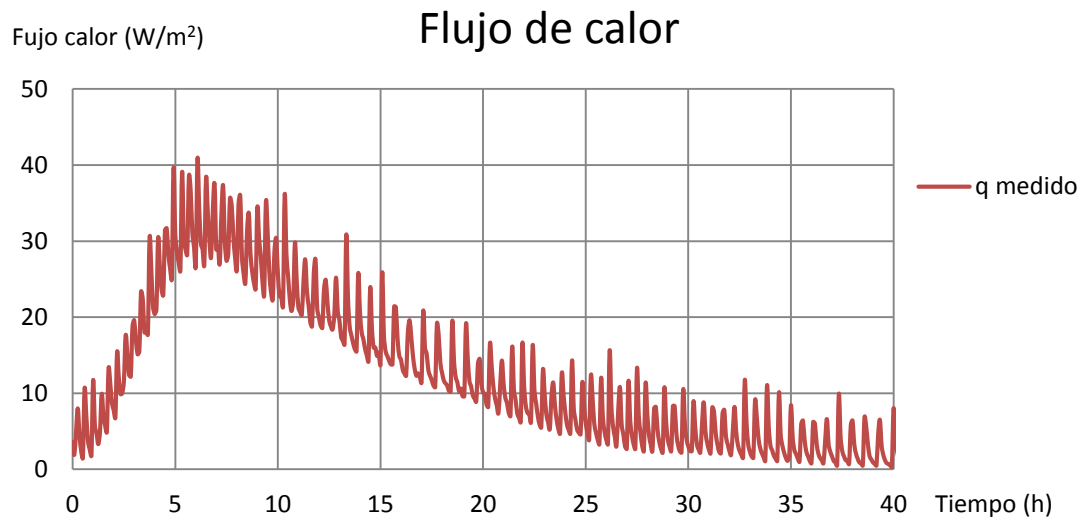


Figura IV.28. Flujo de calor Experimento carga 4h

En este caso la energía aportada por el hilo es la siguiente y se va a calcular mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 4 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 2304000 \text{ J}$$

Para calcular la energía disipada por la losa de áridos se va a aplicar la segunda forma de comprobación (Eq IV.5):

$$E = \int_0^{Tf} Q \cdot dt \rightarrow E = 1826340 \text{ J}$$

El análisis de datos se llevará a cabo en el último apartado del capítulo.

IV.6.5. Calentamiento 1 hasta estabilizar en régimen estacionario

Se va a realizar esta comprobación para el experimento de calentamiento largo del día 08-06-16, y se van a representar las gráficas de la temperatura (Figura IV.29) y el flujo de calor (Figura IV.30) en función del tiempo.

Para este caso, la temperatura ambiente ha sido de unos 20°C y se ha dejado que las temperaturas correspondientes a los diferentes planos de la losa de áridos se estabilicen hasta alcanzar un valor constante (Régimen estacionario).

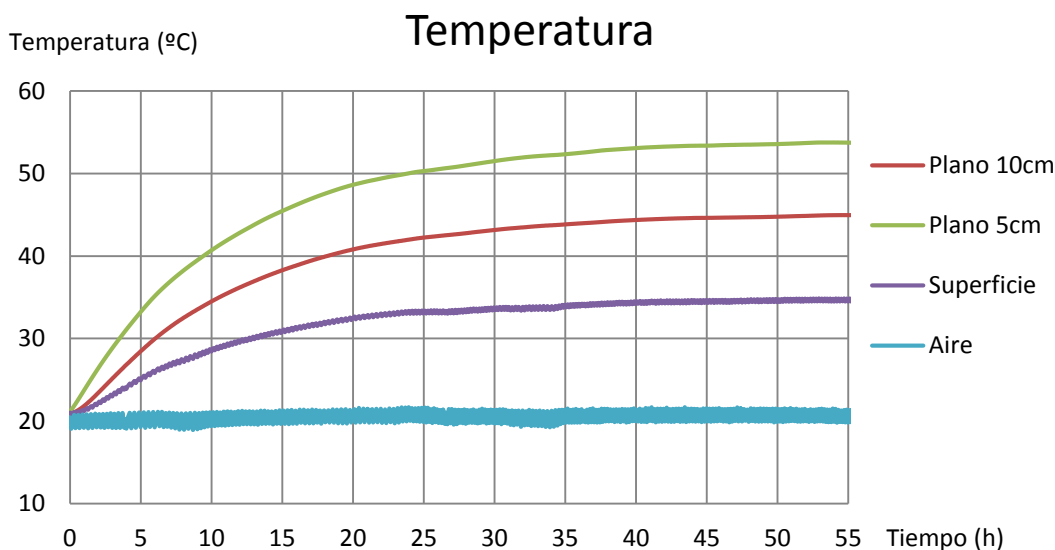


Figura IV.29. Evolución Temperatura Experimento 1 Áridos

El flujo de calor se ha estabilizado alrededor de los 110W/m², valor inferior al alcanzado en la losa de hormigón.

Hay que destacar que debajo de la losa de áridos hay una de hormigón de menor espesor y que esta ha de ser cuantificada para los cálculos de calor disipado. Por ello el proceso de cálculo se va a dividir en 2 partes para calcular, por un lado, la energía disipada por la losa de áridos y, por otro lado, la disipada por la losa de hormigón.

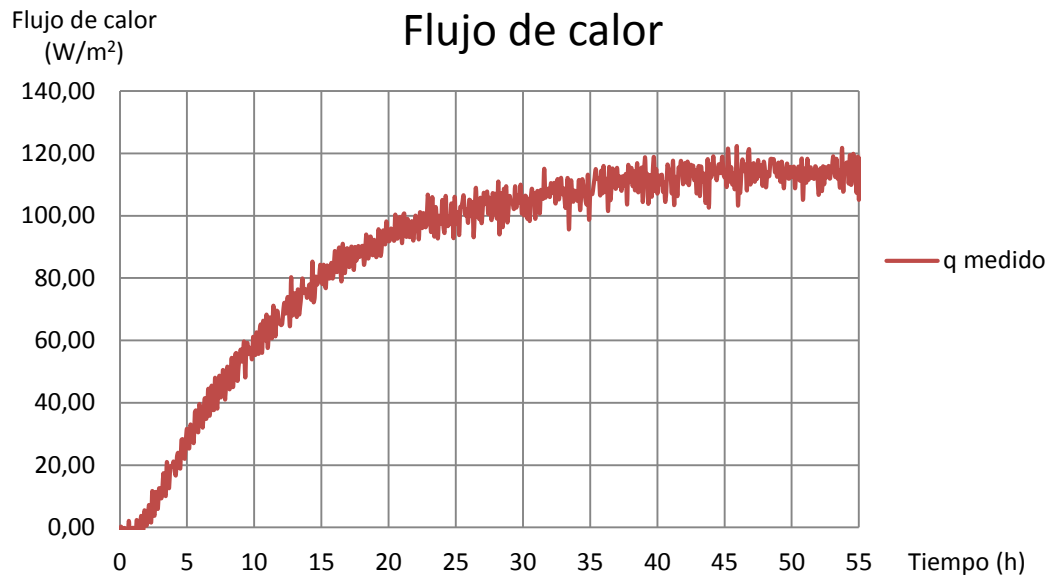


Figura IV.30. Evolución Flujo de Calor Experimento 1 Áridos

En este caso la energía aportada por el hilo es la siguiente y se va a calcular mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \text{ J/s} \cdot 55 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \rightarrow E = 31680000 \text{ J}$$

La primera forma de comprobación consiste en la aplicación de la ecuación (Eq IV.4) y se han de tener en cuenta:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{áridos}} &= 1777,3 \text{ Kg/m}^3 \quad C_p = 795 \text{ J/Kg} \cdot \text{K} \\ E &= \sum_0^N (M \cdot C_p \cdot \Delta T) + \int_0^{T_1} Q \cdot dt = \\ &= \left(0,05 \text{ m}^3 \cdot 1777,3 \text{ Kg/m}^3 \cdot 795 \text{ J/Kg} \cdot \text{K} \right) \cdot \\ &\quad \cdot \left[\left(\frac{53,75 + 44,96}{2} - 20,9 \right) + \left(\frac{44,96 + 34,5}{2} - 20,9 \right) \right] \\ &\quad + 17440530 \text{ J} \rightarrow E_1 = 20781105,3 \text{ J} \end{aligned}$$

Estos datos corresponden con el calor acumulado en la losa de áridos más el calor disipado por la cara superior. Falta por calcular la parte acumulada correspondiente a la losa de hormigón.



Para ello se necesita la temperatura en la base del hormigón. Esta va a ser calculada mediante la ecuación (Eq IV.1):

$$\dot{Q} = \frac{K \cdot A \cdot \Delta T}{\Delta x} = 113,7 = \frac{2,06 \cdot 1 \cdot (T - 53,75)}{5 \cdot 10^{-2}} \rightarrow T = 56,51^{\circ}\text{C}$$

Con este dato ya se puede calcular el resto de la energía acumulada en la losa. Aplicaré la ecuación (Eq IV.4).

$$E_2 = \left(0,05\text{m}^3 \cdot 2276 \text{Kg}/\text{m}^3 \cdot 1000 \text{J}/\text{Kg} \cdot \text{K}\right) \cdot \left[\left(\frac{56,51 + 53,75}{2} - 20,9\right)\right]$$
$$E_2 = 3896400,9\text{J}$$

La energía total será:

$$E = E_1 + E_2 \rightarrow E = 24677506,2\text{J}$$



IV.6.6. Calentamiento 2 hasta estabilizar en régimen estacionario

Se va a realizar esta comprobación para el experimento de calentamiento largo del día 02-06-16, y se van a representar las gráficas de la temperatura (Figura IV.31) y el flujo de calor (Figura IV.32) en función del tiempo.

Para este caso, la temperatura ambiente ha sido de unos 20°C y se ha dejado que las temperaturas correspondientes a los diferentes planos de la losa de áridos se estabilicen hasta alcanzar un valor constante (Régimen estacionario).

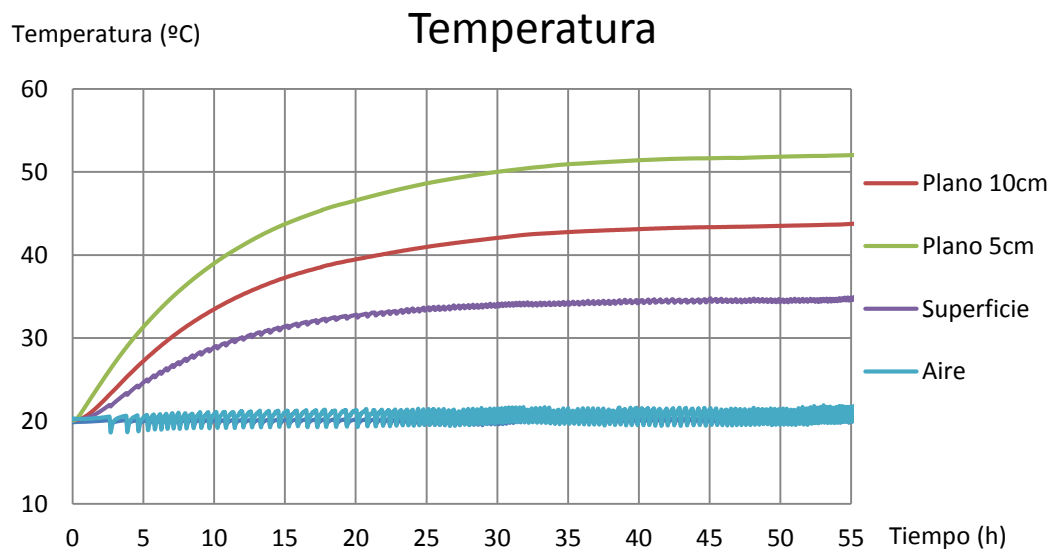


Figura IV.31. Evolución Temperatura Experimento 2 Áridos

El flujo de calor se ha estabilizado alrededor de los 110W/m², valor inferior al alcanzado en la losa de hormigón.

Hay que destacar que debajo de la losa de áridos hay una de hormigón de menor espesor y que esta ha de ser cuantificada para los cálculos de calor disipado. Por ello el proceso de cálculo se va a dividir en 2 partes para calcular, por un lado, la energía disipada por la losa de áridos y, por otro lado, la disipada por la losa de hormigón.

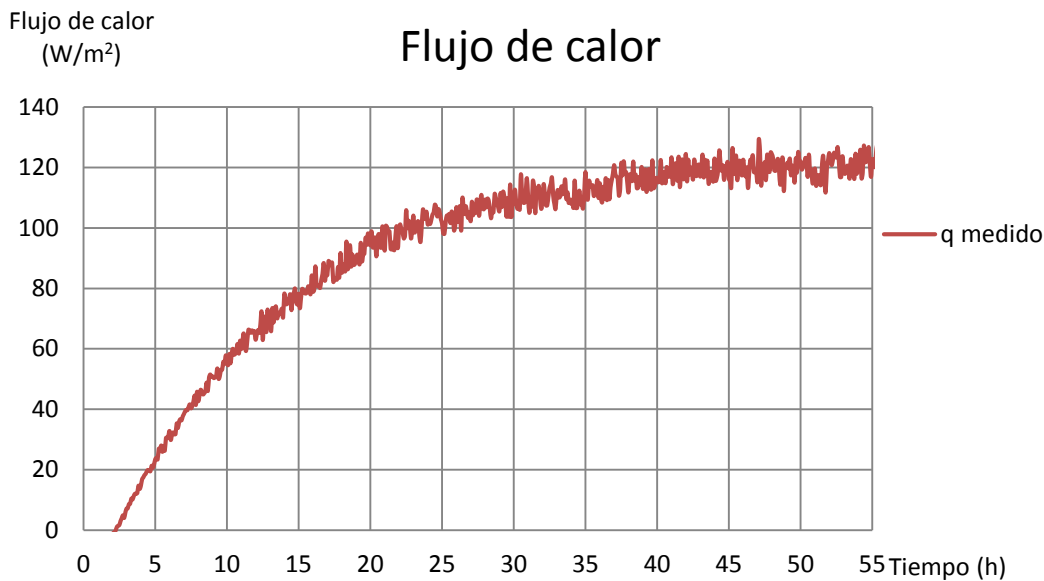


Figura IV.32. Evolución Flujo de Calor Experimento 1 Áridos

En este caso la energía aportada por el hilo es la siguiente y se va a calcular mediante la ecuación (Eq IV.3):

$$E = P \cdot t = 160 \frac{J}{s} \cdot 55h \cdot 3600 \frac{s}{h} \rightarrow E = 31680000J$$

La primera forma de comprobación consiste en la aplicación de la ecuación (Eq IV.4) y se han de tener en cuenta:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{áridos}} &= 1777,3 \frac{Kg}{m^3} \quad C_p = 795 \frac{J}{Kg \cdot K} \\ E &= \sum_0^N (M \cdot C_p \cdot \Delta T) + \int_0^{T1} Q \cdot dt = \\ &= \left(0,05m^3 \cdot 1777,3 \frac{Kg}{m^3} \cdot 795 \frac{J}{Kg \cdot K} \right) \cdot \\ &\quad \cdot \left[\left(\frac{52,73 + 44,08}{2} - 20,2 \right) + \left(\frac{44,08 + 34,65}{2} - 20,2 \right) \right] \\ &\quad + 17798640J \rightarrow E = 21145220,3 \end{aligned}$$

Estos datos corresponden con el calor acumulado en la losa de áridos más el calor disipado por la cara superior. Falta por calcular la parte acumulada correspondiente a la losa de hormigón.



Para ello se necesita la temperatura en la base del hormigón. Esta va a ser calculada mediante la ecuación (Eq IV.1):

$$\dot{Q} = \frac{K \cdot A \cdot \Delta T}{\Delta x} = 125,93 = \frac{2,06 \cdot 1 \cdot (T - 52,73)}{5 \cdot 10^{-2}} \rightarrow T = 55,78^{\circ}\text{C}$$

Con este dato ya se puede calcular el resto de la energía acumulada en la losa. Aplicaré la ecuación (Eq IV.4).

$$E_2 = \left(0,05\text{m}^3 \cdot 2276 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot \left[\left(\frac{55,78 + 52,73}{2} - 20,9\right)\right]$$
$$E_2 = 3796799,65\text{J}$$

La energía total será:

$$E = E_1 + E_2 \rightarrow E = 24942020\text{J}$$



IV.7. Cálculo de la Difusividad térmica de los áridos

Se puede definir la Difusividad térmica como el índice que expresa la velocidad de cambio en un material hasta alcanzar el equilibrio térmico. Para el cálculo de esta se va a utilizar la siguiente ecuación (Eq IV.6):

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (\text{Eq IV.6})$$

Siendo:

α Difusividad térmica (m^2/s)

K Conductividad térmica ($W/m \cdot K$)

ρ Densidad (Kg/m^3)

C_p Calor específico ($J/Kg \cdot K$)

En el caso de los áridos si se aplica esta fórmula (Eq IV.6) se obtiene:

$$\alpha = \frac{0,65 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{1777,3 \text{ Kg/m}^3 \cdot 795 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}} = 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Este resultado se encuentra dentro de los valores proporcionados por [1, Miliarum, 2008], que son de $0,296 \cdot 10^{-6}$ a $0,521 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



IV.8. Análisis de resultados

La Conductividad térmica es mayor en la losa de hormigón que en la de áridos por tanto el hormigón conduce mejor el calor.

$$k_{\text{hormigón}} > k_{\text{áridos}}$$

En la siguiente tabla (Tabla IV.1) se van a comparar las energías disipadas por cada tipo de losa y el porcentaje del total del calor del calor aportado que representan.

Tabla IV.1. Comparación energías disipadas según el tipo de material

Proceso	Q _{teórica} (J)	Hormigón		Áridos	
		Q _{experim} (J)	%	Q _{experim} (J)	%
1h	576000	502140	87,17	411960	71,52
2h	1152000	1002600	87,03	854250	74,15
4h	2304000	1984320	86,12	1826340	79,26
Exp 1	31680000	28844346	91,05	23437548	77,89
Exp 2	31680000	29180830	92,11	24942020	78,73

Como se puede apreciar, existen una mayor cantidad de pérdidas no cuantificadas a través del material aislante en los áridos que en el hormigón. Esto se debe a que la conductividad de los áridos es menor.

Además, hay una parte menor del calor que se transmite a través del material aislante que protege al hormigón o al aislante, al ser además imposible obtener un material de conductividad nula, nunca se va a dar el caso de que el calor teórico sea igual al calculado por muy baja que sea la conductividad del material aislante que lo envuelve.

En cuanto al tiempo de estabilización y al incremento de temperatura para los experimentos cortos, estos serían los datos recogidos en una tabla (Tabla IV.2):

Tabla IV.2. Comparación tiempos de estabilización e incrementos de temperatura según el tipo de material

Proceso	Hormigón		Áridos	
	Tiempo (h)	ΔT (°C)	Tiempo (h)	ΔT (°C)
1h	22,04	3,90	14,1	2,29
2h	16,21	5,83	21,2	4,53
4h	17,87	9,30	23,3	9,03

Como se puede apreciar, el incremento de temperatura suele ser mayor en el hormigón para los 3 casos, esto se debe a la elevada difusividad térmica de este material. En cambio, el tiempo de estabilización (exceptuando el experimento de una hora del hormigón que tarda más tiempo en estabilizarse debido a variaciones en la temperatura del aire al final del experimento) es mayor en el caso de la losa de áridos. Esto se debe a la menor difusividad térmica de este tipo de material.

Realizando un breve estudio acerca de los experimentos largos se han sacado estos datos y se han representado en la siguiente tabla:

Tabla IV.3. Tiempo de establecimiento de régimen estacionario e incremento de temperatura según el tipo de material

Proceso	Hormigón			Áridos		
	Tiempo (h)	ΔT (°C)		Tiempo (h)	ΔT (°C)	
1° Exp	35-45h	5cm	41,7	60-70h	5cm	52,71
		10cm	38,3		10cm	44,04
		Sup	33,6		Sup	34,8
2° Exp	35-45h	5cm	45,2	60-70h	5cm	52,7
		10cm	41,2		10cm	44,1
		Sup	37,6		Sup	34,7

A la vista está que el tiempo necesario para que la temperatura de la losa se encuentre en régimen estacionario es considerablemente menor en el caso del hormigón. Este fenómeno se debe nuevamente a la difusividad térmica.



Que en diferentes experimentos en el caso del hormigón las temperaturas alcanzadas no sean las mismas en las mismas zonas de la losa se debe a la temperatura del aire en casa experimento, la cual varía del primer al segundo experimento de 24°C a 20°C. Esto no ocurre para los experimentos de la losa de áridos ya que en ambos la temperatura del aire es constante e igual a 20°C.

Por otro lado, que la temperatura alcanzada en las diferentes partes de la losa de áridos sea mayor que la alcanzada en el hormigón se debe a que este material, al tener una menor conductividad, permite una menor transferencia de calor, y este se acumulará entre la losa de áridos y la placa de metal.

La demostración es la siguiente:

$$Q = \Delta T/R \quad \text{donde} \quad R = e/K$$

Para el mismo espesor (e) de losa, al tener los áridos una menor conductividad (K), estos ejercerán una mayor resistencia (R) al flujo de calor (Q). Por tanto, para disipar el flujo de calor generado por el hilo de valor constante, el incremento de temperatura (ΔT) que debe existir entre cualquier punto de la losa y el ambiente será mayor para la losa de áridos que para la de hormigón.

A la hora de hablar de la difusividad térmica de cada material se van a representar ambos valores en la siguiente tabla (Tabla IV.4):

Tabla IV.4. Inercia térmica según el tipo de material

	Hormigón	Áridos
Difusividad térmica (m ² /s)	9,1 · 10 ⁻⁷	4,6 · 10 ⁻⁷

Según estos datos el hormigón va a responder de forma más rápida ante aportes de calor variables, aspecto que habrá que tener en cuenta en futuros estudios para extender los resultados de las configuraciones de áridos al comportamiento real del hormigón.



IV.9. Referencias

- [1] Miliarum. “Propiedades Térmicas de Materiales”. Año 2008
Disponible en:
<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTerminicas.asp>



Capítulo V

Conclusiones y trabajos futuros

Índice de contenido

V.1. Conclusiones	173
V.2. Trabajos Futuros	174





V.1. Conclusiones

A continuación se presentan y comentan las conclusiones de mayor relevancia derivadas de este Trabajo Fin de Grado.

- Entre los materiales disponibles para la construcción de un edificio, el **hormigón** no solo destaca por sus características mecánicas como resistencia a compresión, dureza, comportamiento al fuego... o por su precio y facilidad de formación. Este material también **puede tener un uso importante en calefacción y refrigeración debido a su elevada capacidad de acumulación térmica** e inercia térmica. Estas características térmicas son actualmente desaprovechadas en la edificación de una forma generalizada y supondrían un importante ahorro de energía y, en consecuencia, de dinero, como se ha visto en el capítulo I.
- El uso de elementos estructurales activados definidos en el capítulo II representa una forma de aprovechar las características térmicas del hormigón de una forma más eficiente, al estar los sistemas de calefacción y refrigeración directamente embebidos en la estructura. De esta forma el calor generado se acumularía en la estructura del edificio y solo haría falta variar la temperatura de la estructura un determinado tiempo para poder aprovechar el calor o el frío residual durante un tiempo mucho mayor. Las gráficas representadas en el capítulo IV dan fe de ello.
- El presente trabajo sienta las bases para el desarrollo de una investigación experimental futura más detallada sobre el comportamiento de losas de hormigón activadas en los que se fundamentan los sistemas TABS.
- Una de las principales aportaciones de este trabajo ha consistido en el **planteamiento, construcción y montaje de un dispositivo experimental** completo destinado al análisis térmico de losas de distintos materiales. Los resultados derivados de la caracterización térmica de los materiales analizados revelan la validez de la instalación y validan su utilización para futuras investigaciones.
- Se ha comparado el comportamiento térmico de una losa de hormigón de 15 cm de espesor con una configuración semejante de áridos, obteniendo una caracterización detallada de las evoluciones transitorias de temperatura ante sencillos experimentos de carga y descarga térmica. **La información extraída de dichos experimentos es fundamental para poder relacionar ambos comportamientos.** En particular se ha observado que el tiempo de calentamiento y enfriamiento del hormigón es mucho



menor que el de la mezcla de áridos, obteniéndose los correspondientes valores de difusividad térmica en cada caso.

- La información proporcionada en este trabajo **abre la puerta al estudio de distintas configuraciones de losas (espesores, profundidad de la capa activa, etc.) de una forma flexible** a través del análisis del comportamiento de modelos de arena y grava y la extensión de los resultados al caso del hormigón. De este modo, se reducirá en gran medida el esfuerzo y los costes asociados a la construcción y manejo de pesadas losas de hormigón.

V.2. Trabajos Futuros

Tal como ya se ha adelantado de algún modo, el trabajo aquí presentado constituye una base fundamental y preliminar que pretende hacer posible el desarrollo de investigaciones futuras más completas y de mayor alcance. Entre ellas conviene destacar los siguientes dos puntos, que se proponen para su realización en siguientes pasos:

- Realización de análisis paramétricos tanto en modo refrigeración como en modo calefacción de distintas configuraciones de losas (realizados indirectamente sobre modelos de arena y grava) variando espesores, profundidad de capa activa, temperaturas de impulsión de agua y de ambiente interior, etc.
- Validación experimental de modelos matemáticos del estudio de la transferencia de calor en elementos constructivos (por ejemplo, factores respuesta, funciones de transferencia, modelos específicos para sistemas activos, etc.)



Anexo

Calibración Sondas de Temperatura

Índice de contenido

A.1. Introducción a la calibración de las sondas de temperatura.....	177
A.2. Sondas 1-5	178
A.3. Sondas 6-10	181
A.4. Sondas 11-13	184
A.5. Sondas 14-17	186



Índice de Figuras

Figura A.1. Variación Temperaturas sondas 1-5	178
Figura A.2. Recta calibración sonda 1	179
Figura A.3. Recta calibración sonda 2	179
Figura A.4. Recta calibración sonda 4	179
Figura A.5. Recta calibración sonda 4	180
Figura A.6. Recta calibración sonda 5	180
Figura A.7. Variación Temperaturas sondas 6-10	181
Figura A.8. Recta calibración sonda 6	182
Figura A.9. Recta calibración sonda 7	182
Figura A.10. Recta calibración sonda 8	182
Figura A.11. Recta calibración sonda 9	183
Figura A.12. Recta calibración sonda 10	183
Figura A.13. Variación Temperaturas sondas 11-13	184
Figura A.14. Recta calibración sonda 11	185
Figura A.15. Recta calibración sonda 12	185
Figura A.16. Recta calibración sonda 13	185
Figura A.17. Variación Temperaturas sondas 14-17	186
Figura A.18. Recta calibración sonda 14	187
Figura A.19. Recta calibración sonda 15	187
Figura A.20. Recta calibración sonda 16	187
Figura A.21. Recta calibración sonda 17	188



A.1. Introducción a la calibración de las sondas de temperatura

El proceso ha consistido en introducir un cierto número de sondas (En este caso limitado a 5 debido al tamaño del horno), previamente conectadas al sistema de adquisición de datos, en el horno de calibración de temperatura variando esta durante intervalos regulares de aproximadamente 20 minutos.

Transmitiendo los datos captados por el sistema de adquisición a nuestro ordenador se han calculado las diferentes rectas de regresión que proporcionan el valor de la temperatura real a partir de la temperatura medida por la sonda.

Las sondas se han calibrado en estos intervalos según su numeración:

- Sondass 1-5
- Sondass 6-10
- Sondass 11-13
- Sondass 14-17

Los datos que se van a representar se pueden dividir en 3 partes:

- Tabla con las temperaturas que han medido las sondas una vez alcanzado el régimen estacionario.
- Gráfica de la variación global de la temperatura de las sondas en función del tiempo.
- Rectas de regresión que relacionan las temperaturas que miden las sondas con las temperaturas reales.

A.2. Sondas 1-5

Temperatura (°C)	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
0	1,47	0,87	0,49	0,32	0,51
10	10,68	10,39	10,18	10,18	10,21
20	19,99	20,00	19,94	20,20	19,97
30	29,40	29,69	29,76	30,19	29,77
40	38,92	39,43	39,60	40,17	39,61
50	48,51	49,22	49,48	50,12	49,47
45	43,74	44,33	44,52	45,12	44,54
35	34,25	34,61	34,69	35,08	34,71
25	24,79	24,91	24,88	25,13	24,91
15	15,44	15,27	15,10	15,19	15,13
5	6,16	5,69	5,37	5,29	5,40

Tabla A.1. Temperaturas sondas 1-5

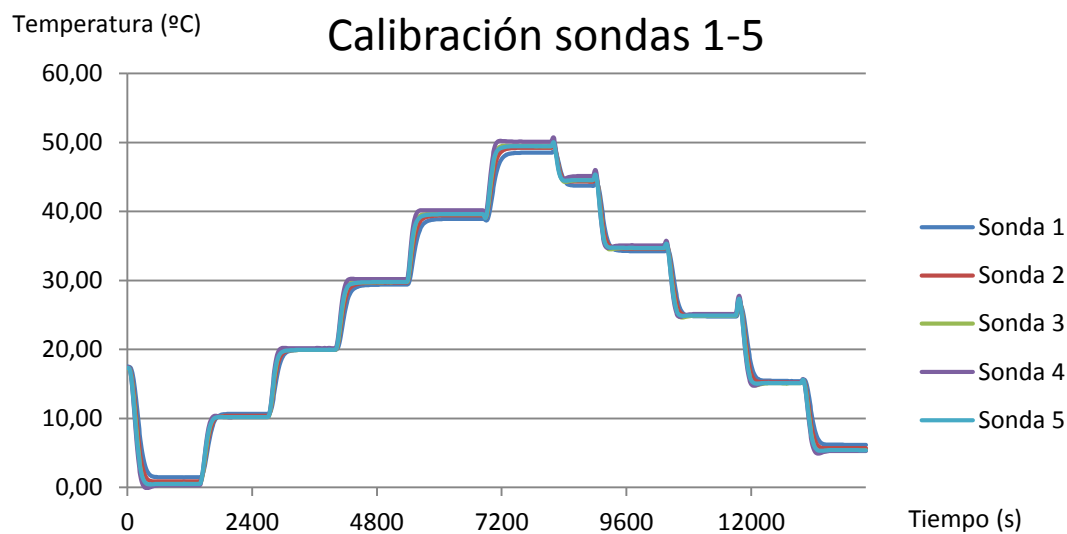


Figura A.1. Variación Temperaturas sondas 1-5

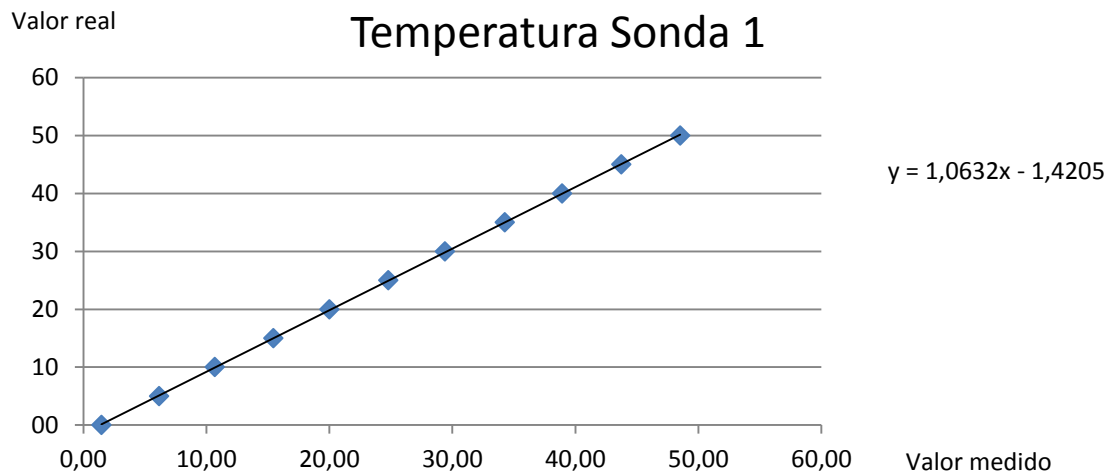


Figura A.2. Recta calibración sonda 1

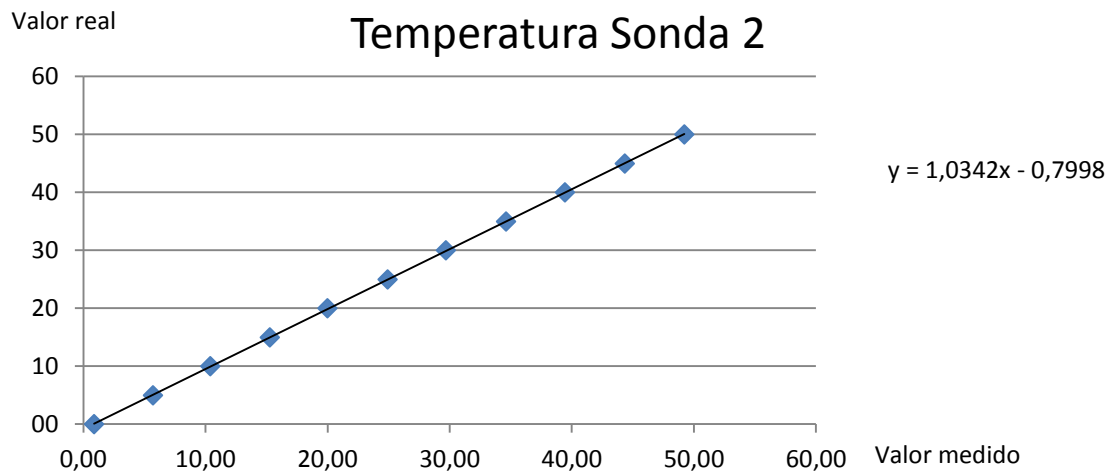


Figura A.3. Recta calibración sonda 2

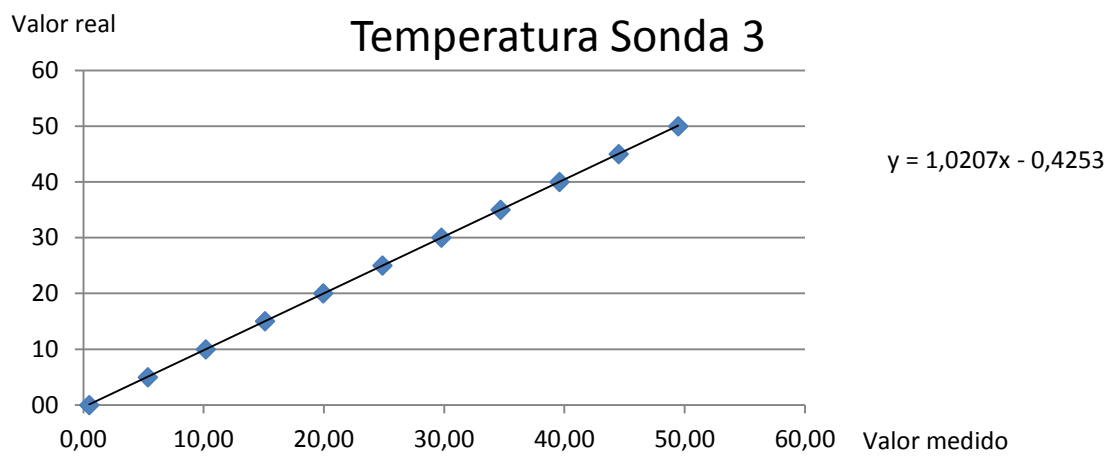


Figura A.4. Recta calibración sonda 4

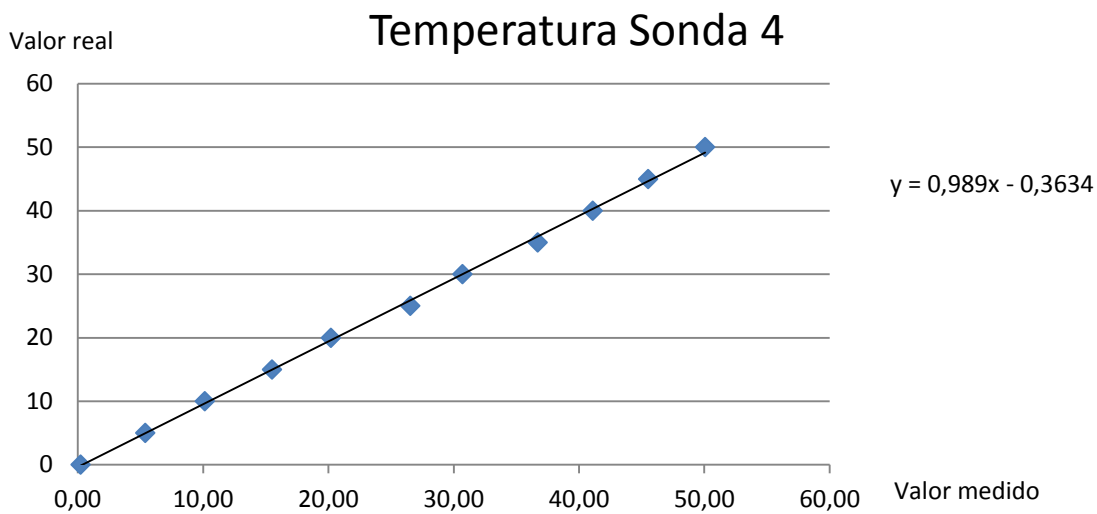


Figura A.5. Recta calibración sonda 4

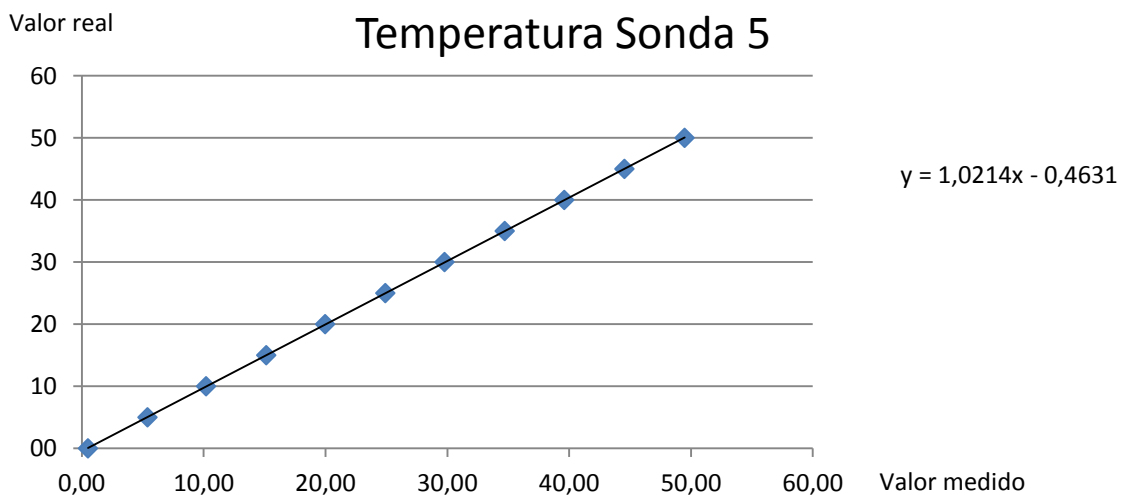


Figura A.6. Recta calibración sonda 5



A.3. Sondas 6-10

Temperatura (°C)	Sonda 6	Sonda 7	Sonda 8	Sonda 9	Sonda 10
0	0,47	0,85	1,02	0,90	0,86
10	10,26	10,43	10,50	10,45	10,38
20	20,03	20,05	20,06	20,05	20,00
30	29,90	29,79	29,68	29,72	29,69
40	39,79	39,57	39,37	39,45	39,43
50	49,70	49,38	49,10	49,23	49,21
45	44,72	44,46	44,30	44,37	44,38
35	34,85	34,70	34,60	34,65	34,63
25	24,95	24,91	24,93	24,91	24,89
15	15,10	15,21	15,32	15,26	15,21
5	5,33	5,59	5,75	5,66	5,57

Tabla A.2. Temperaturas sondas 6-10

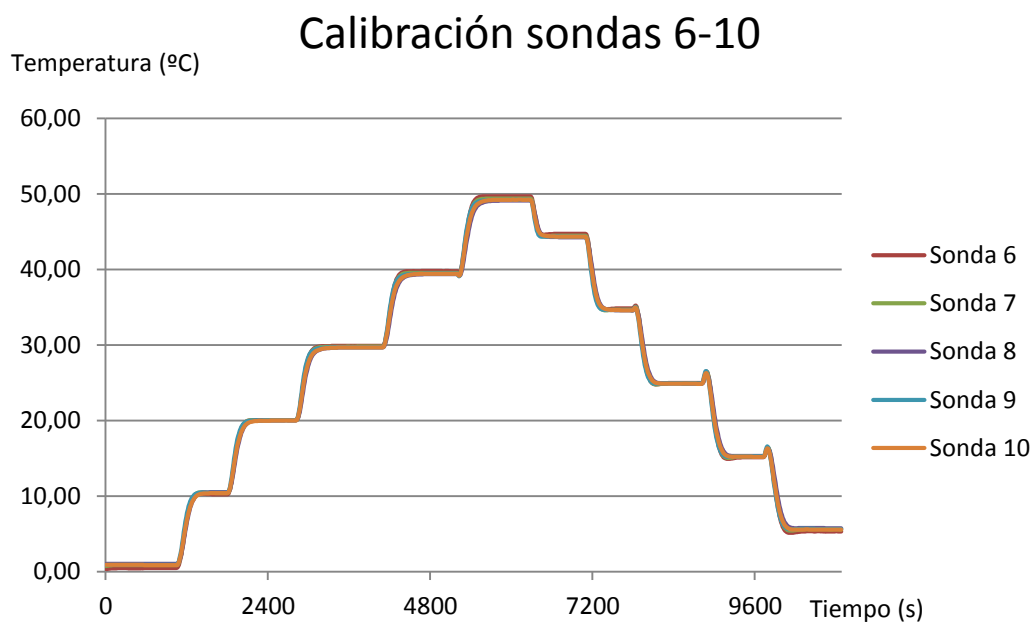


Figura A.7. Variación Temperaturas sondas 6-10

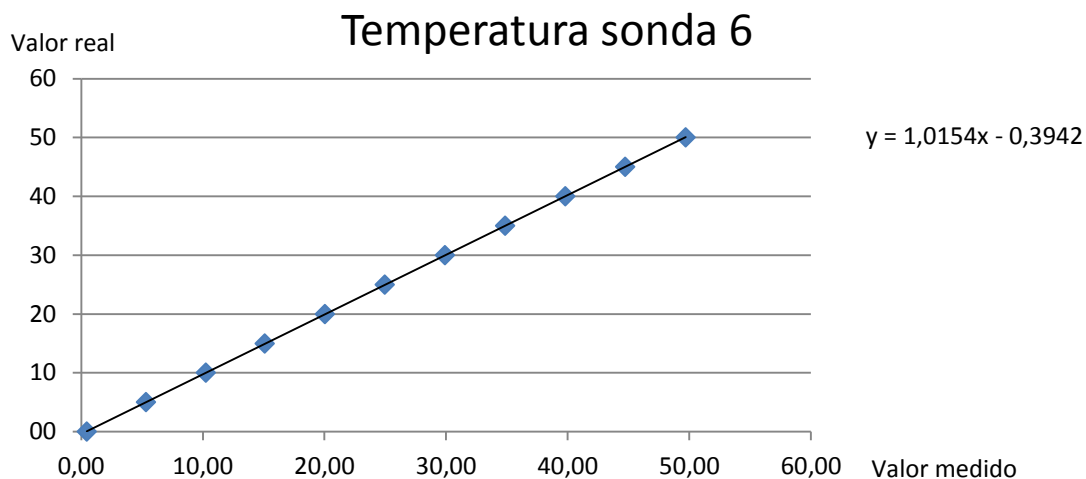


Figura A.8. Recta calibración sonda 6

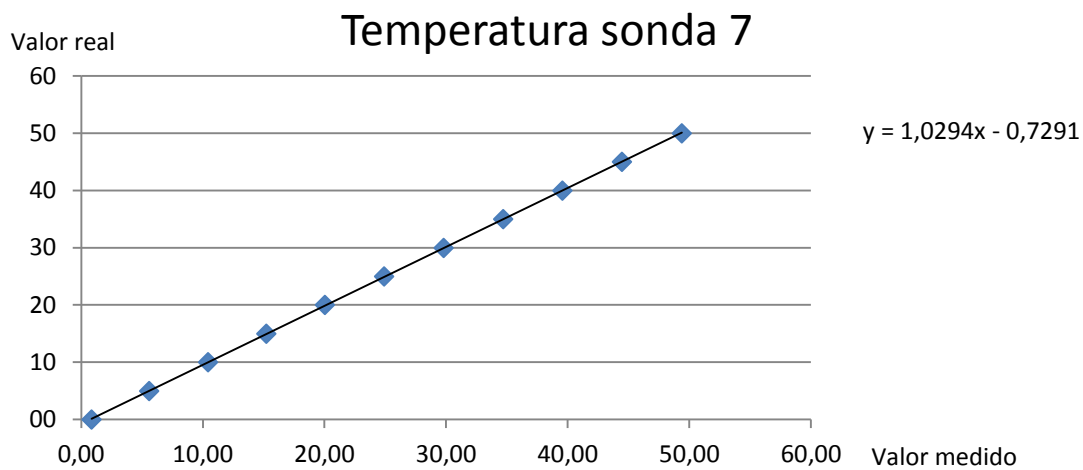


Figura A.9. Recta calibración sonda 7

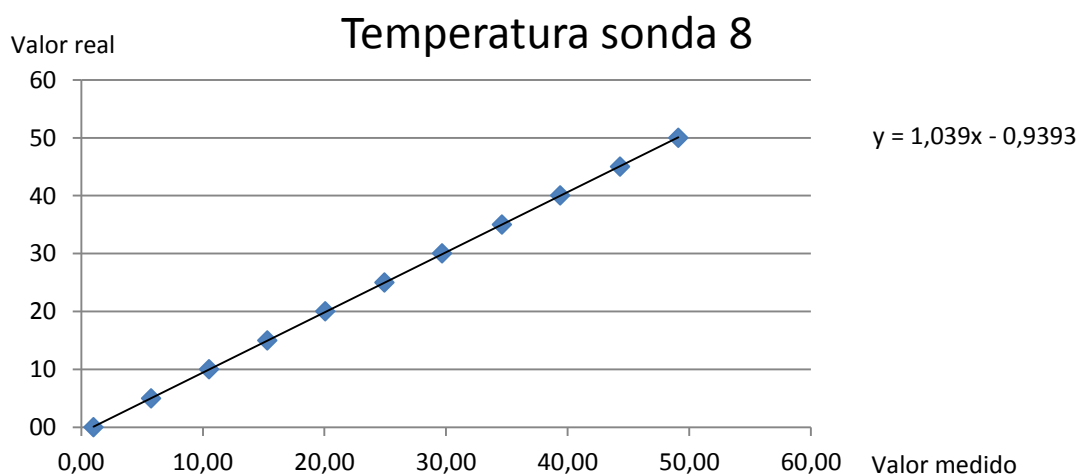


Figura A.10. Recta calibración sonda 8

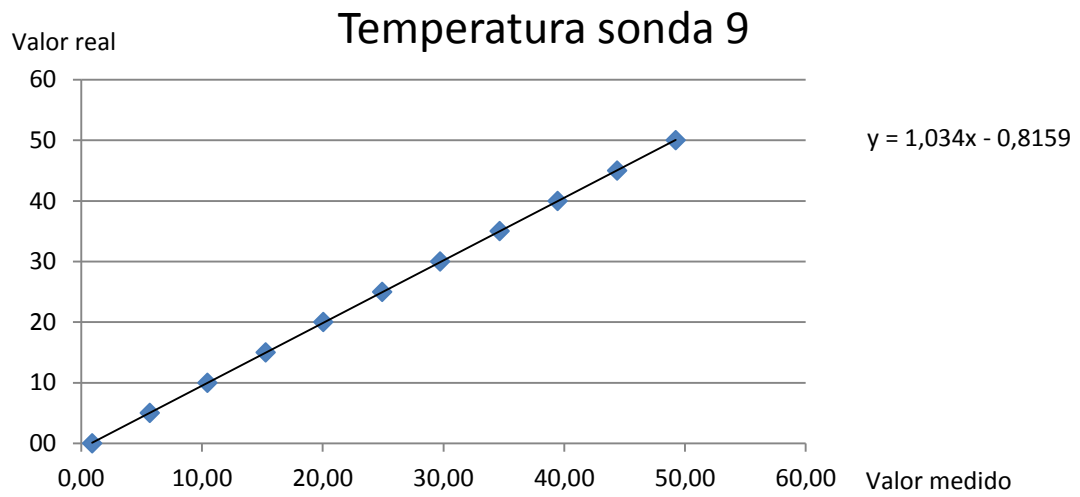


Figura A.11. Recta calibración sonda 9

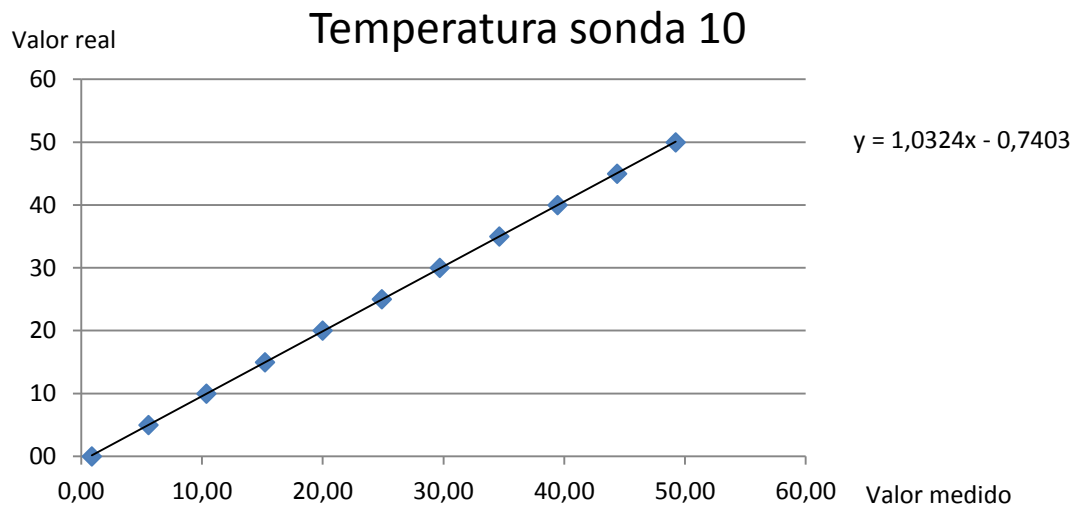


Figura A.12. Recta calibración sonda 10

A.4. Sondas 11-13

Temperatura (°C)	Sonda 11	Sonda 12	Sonda 13
0	0,49	0,92	0,68
10	10,24	10,39	10,29
20	19,99	19,97	19,96
30	29,82	29,65	29,71
40	39,68	39,37	39,50
50	49,59	49,12	49,32
45	44,63	44,27	44,43
35	34,77	34,57	34,65
25	24,90	24,90	24,93
15	15,09	15,29	15,21
5	5,35	5,71	5,49

Tabla A.3. Temperaturas sondas 11-13

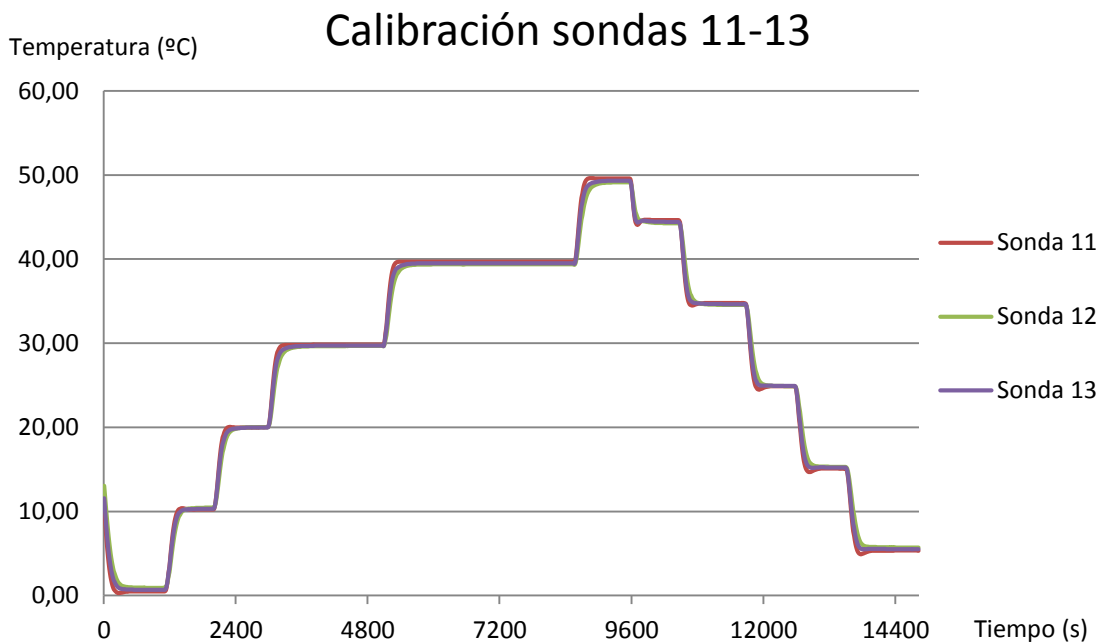


Figura A.13. Variación Temperaturas sondas 11-13

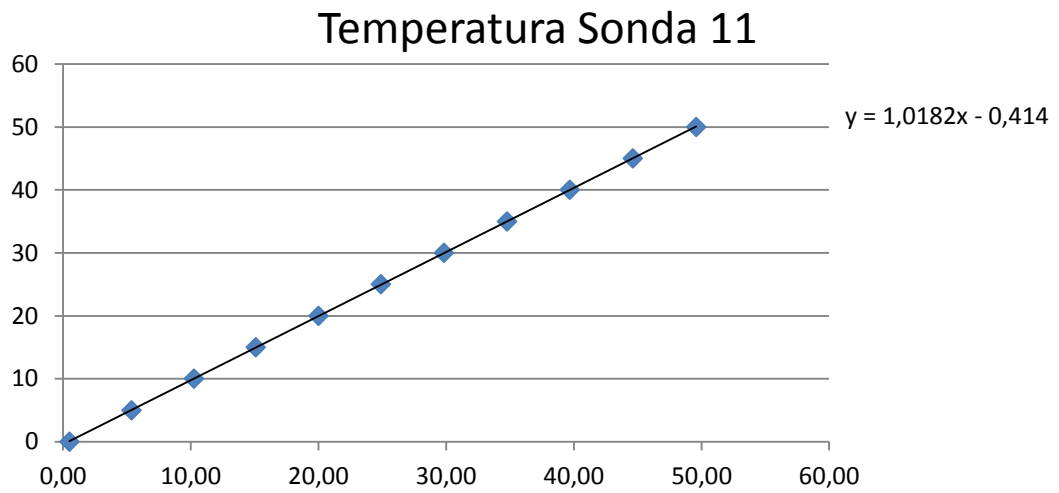


Figura A.14. Recta calibración sonda 11

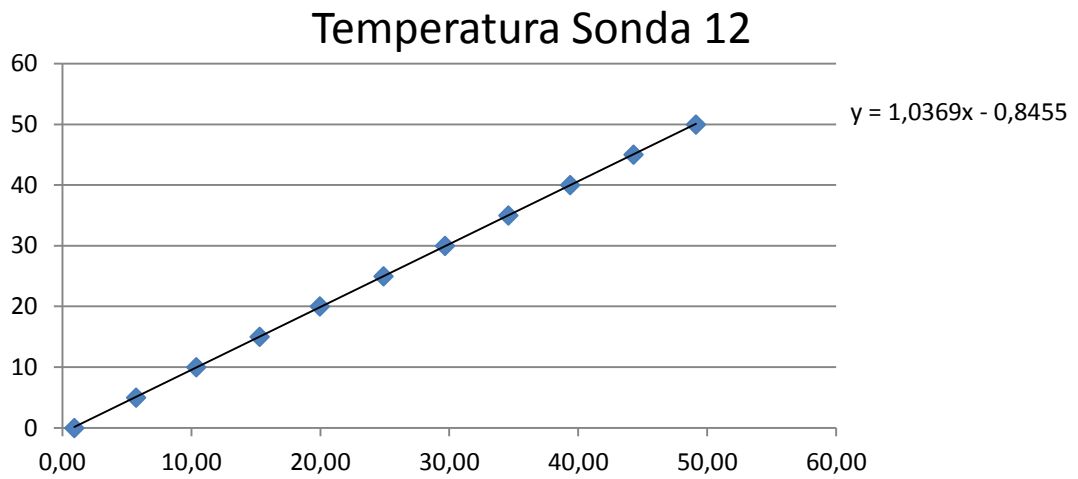


Figura A.15. Recta calibración sonda 12

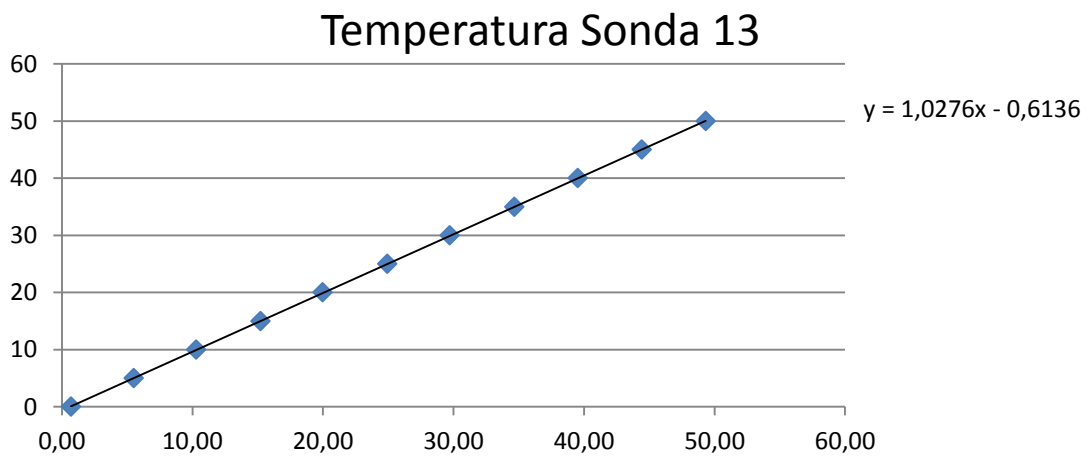


Figura A.16. Recta calibración sonda 13

A.5. Sondas 14-17

Temperatura (°C)	Sonda 14	Sonda 15	Sonda 16	Sonda 17
0	0,03	2,61	2,60	0,61
10	9,85	11,03	11,03	10,28
20	19,70	19,56	19,61	19,97
30	29,58	28,34	28,40	29,79
40	39,47	37,10	37,30	39,65
50	49,42	46,01	46,34	49,53
45	44,46	42,12	42,18	44,65
35	34,58	33,30	33,27	34,80
25	24,69	24,54	24,45	24,97
15	14,83	15,88	15,76	15,17
5	4,97	7,46	7,25	5,39

Tabla A.4. Temperaturas sondas 14-17:

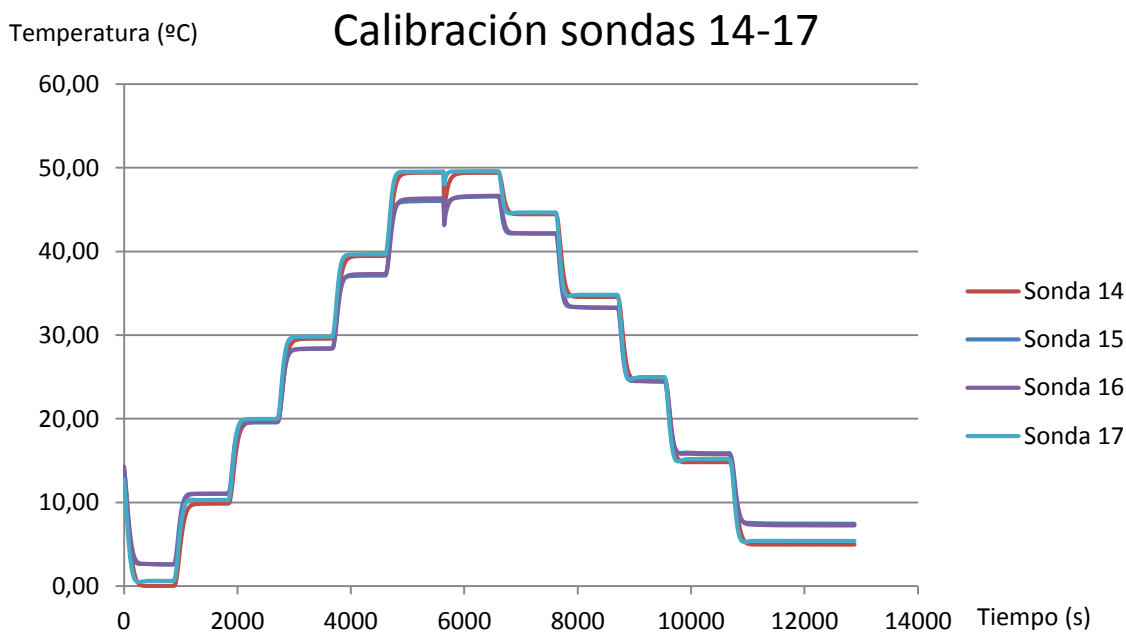


Figura A.17. Variación Temperaturas sondas 14-17

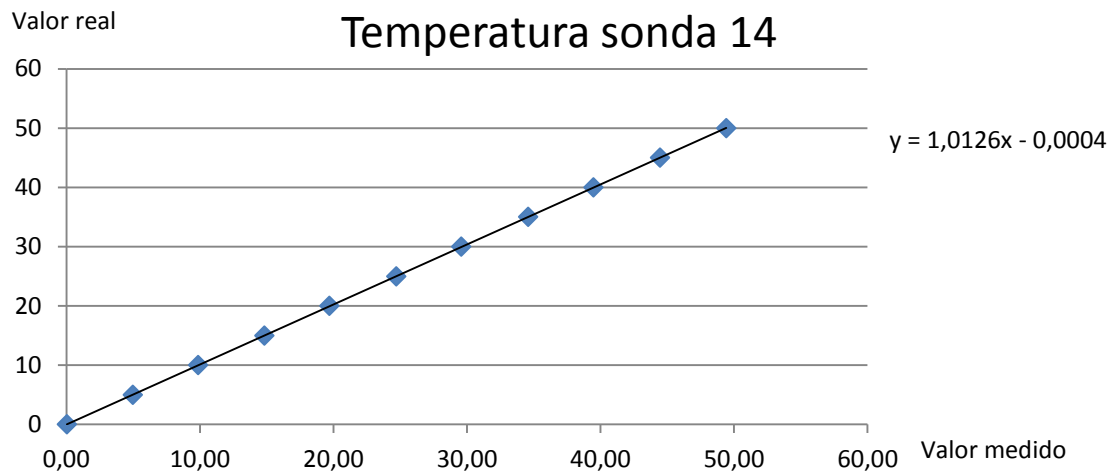


Figura A.18. Recta calibración sonda 14

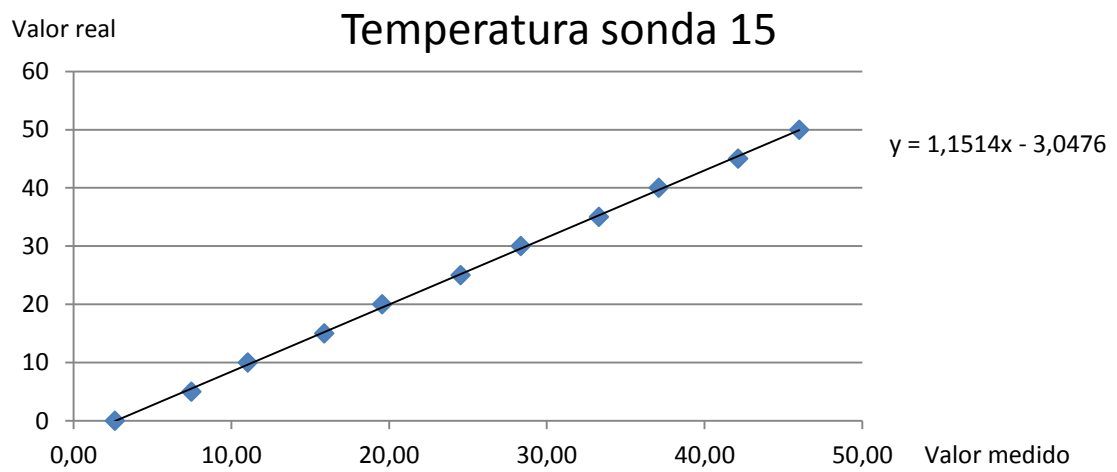


Figura A.19. Recta calibración sonda 15

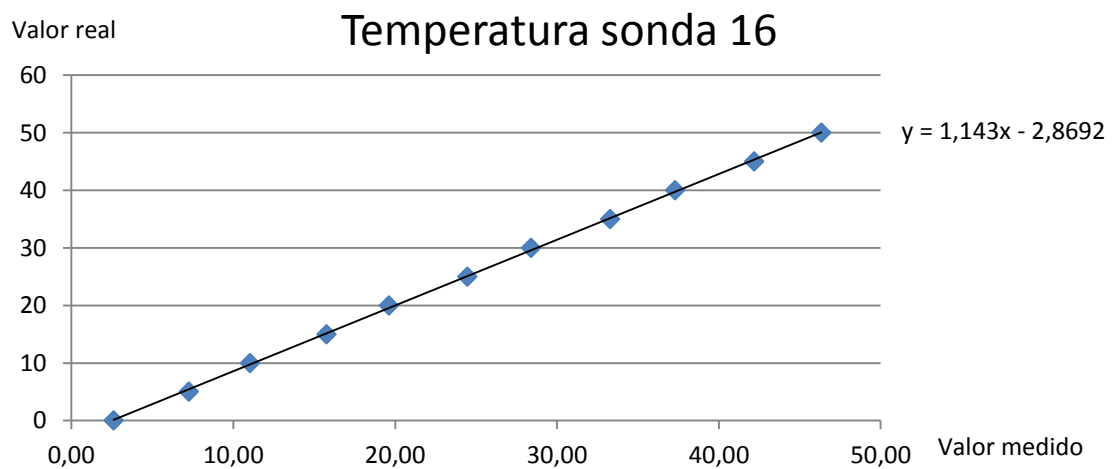


Figura A.20. Recta calibración sonda 16

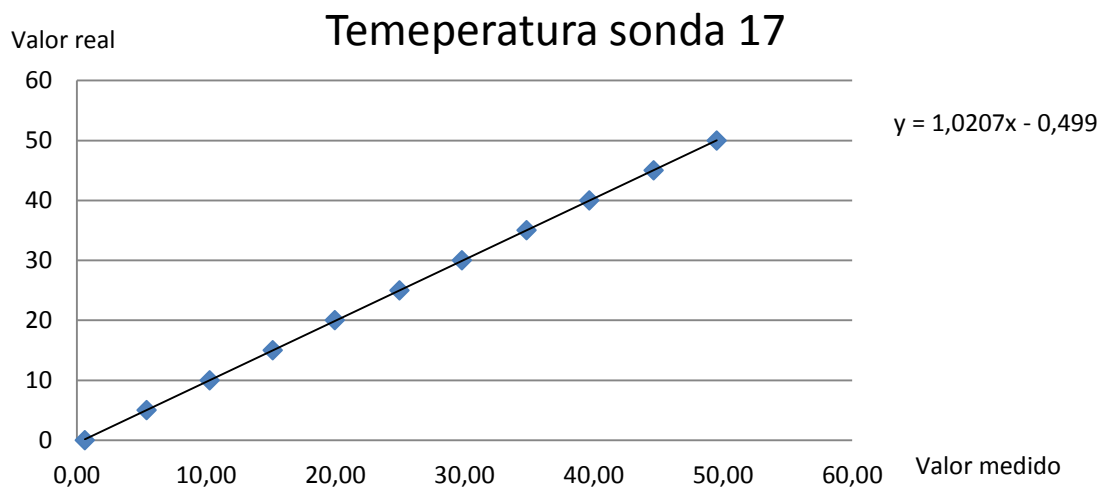


Figura A.21. Recta calibración sonda 17