



Proyecto Fin de Carrera

Instalación de un sistema de
climatización para la
Catedral de León
Memoria(1/2)

Autor

Julio Flecha Lescún

Director

Carlos Monné Bailo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2013

*"Un amigo me preguntaba porqué no
construíamos ahora catedrales como las góticas
famosas, y yo le dije: los hombres de aquellos tiempos
tenían convicciones; nosotros, los modernos, no
tenemos más que opiniones, y para elevar una catedral
gótica hace falta más que una opinión "*

Heinrich Heine

Agradecimientos

Después de realizar un proyecto de tal magnitud y que ha costado tanto tiempo, esfuerzo y dedicación, falta echar la vista atrás y ser generosos con quien nos ha prestado su ayuda sin recibir nada a cambio. Por tanto, quiero dejar constancia que este proyecto no hubiera sido posible sin las personas que a continuación nombro:

- D. Máximo Gómez Rascón, director del Museo Catedralicio-Diocesano de León, quien me recibió en el mes de agosto de 2012 para comentarle este proyecto y que en octubre de ese mismo año me dieron la oportunidad de entrar en todas las dependencias de la Catedral y cogiera cuantos datos fueran necesarios.
- D. Santiago Lescún Romero, mi tío: se molestó en llamar a cuantas personas fueran necesarias para que me pudieran echar una mano en la elaboración de los primeros pasos. Además del libro sobre la Catedral que me ha servido de mucha ayuda.
- D. Juan Carlos Ponga Mallo, encargado del patrimonio artístico de la ciudad de León en el Excelentísimo Ayuntamiento de esta localidad, quien, gracias a él, dispuso de los planos de la Catedral.
- D. Carlos Monné Bailó, director de este proyecto, quien me dio la oportunidad de desarrollarlo al proponérselo, así como sus consejos a lo largo de todo este último año de carrera.
- D. Enrique Cano Suñen, profesor del área de Construcción en la EINA, el cual, siempre me respondió sabiamente acerca de la construcción de Catedrales.
- A todas las personas que trabajan en la Catedral de León, por darme su apoyo y mostrar interés en el trabajo realizado en el interior del templo.
- D. Miguel Ángel Ariza Gracia, compañero de promoción, casi un hermano para mí, que tanto me ha ayudado, no sólo en este proyecto, sino también, a lo largo de toda la carrera.
- A todas esas personas, tanto amigos y familia, que siempre han mostrado interés por lo que hago y, a su manera, han intentado ayudarme.

Resumen

La primera parte de un proyecto de estas características, con un alto contenido artístico, implica un estudio para ver cómo está construido y ver la problemática que entraña un proyecto de calefacción. Por tanto, el primer paso del proyecto es ir a al Catedral, estar en su interior para contabilizar, bancos, luces, detalles referentes a la construcción, planos que eran necesarios para desarrollar el proyecto.

Tras la investigación de la construcción de los sillares de la Catedral y la formación de vidrieras, así como los materiales de los que están formados, se calculan los coeficientes globales de transmisión de calor. Para ello, como era necesario las superficies de los cerramientos, solera, cubiertas y de los amplios ventanales, se realiza un modelo tridimensional a escala para que fuera más fácil la adquisición de estos datos.

Posteriormente, se analizan los diferentes sistemas de conseguir el calor: suelo radiante y sistema convencional por radiadores. Se dimensionan las instalaciones. El sistema de suelo radiante se encuentra sectorizado, esto es, la planta se encuentra dividida en cinco zonas: girola, altar mayor, crucero, coro y trascoro (las cuales se dividen a su vez en más circuitos), las cuales tienen un conjunto de circuitos independientes entre sí, permitiendo que cada zona trabaje cuando sea necesario. Se plantea una instalación de radiadores de baja temperatura con el tamaño adecuado para su situación en los bancos de la iglesia. La segunda instalación, de alta temperatura plantea al instalación de radiadores al ras del suelo, para evitar que dañen la visión del conjunto gótico arquitectónico.

Los grupos generadores de calor serán 3 calderas de condensación de gas natural y una de biomasa.

Como fuente alternativa para calentar el agua de la instalación de suelo radiante, se estudian dos tipos de colectores solares: plano y de tubos de vacío.

A continuación, se presupuesta la instalación completa dividiéndose en baja y alta temperatura. Se realiza un presupuesto básico sin tener en cuenta coste de mano de obra, costes de adquisición de permisos y licencias, etc y únicamente se tiene en cuenta el coste de los equipos.

Para finalizar se realiza una simulación cualitativa de la evolución de las temperaturas en el interior de la Catedral considerando la solución adoptada. Con ella se podrá afirmar que a la altura de 1.80 metros se obtiene una temperatura de confort de 21°C y una humedad relativa de 50%, cumpliéndose las condiciones de diseño

Índice de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 ANTECEDENTES	15
1.2 ALCANCE	15
1.3 OBJETIVO	15
1.4 SECCIONES	16
1.5 ANEXOS	16
2. GENERALIDADES	19
2.1 CONCEPTOS PREVIOS	19
2.1.1 FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	19
2.1.2 SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE	19
2.1.3 SISTEMA DE CALEFACCIÓN CONVENCIONAL	21
2.2 PROCEDIMIENTOS E INSTALACIÓN	22
2.2 TIPO DE INSTALACIÓN	23
2.3 FUENTE DE ENERGÍA	23
2.4 POTENCIA TOTAL INSTALADA	24
2.5 REGLAMENTO Y NORMATIVA APLICADA	24
3. DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA.....	25
3.1 SITUACIÓN Y GEOMETRÍA DE LA CATEDRAL	25
3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS DEPENDENCIAS DE LA CATEDRAL	27
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS VIDRIERAS.....	29
3.3.1 VENTANALES ALTOS	30
3.3.2 VENTANALES ALTOS DEL PRESBITERIO	30
3.3.3 VENTANALES ALTOS DEL CENTRO DEL ÁBSIDE.....	30
3.3.4 ROSETÓN OESTE	31
3.3.5 ROSETÓN SUR Y NORTE	31
3.3.6 TRIFORIO DE LAS NAVES LATERALES.....	31
3.3.7 TRIFORIO DEL PRESBITERIO.....	31
3.3.8 TRIFORIO DEL ÁBSIDE	31
3.3.9 TRIFORIO DE LOS ROSETONES.....	31
3.3.10 MAINELES Y TRACERÍAS DE LAS NAVES BAJAS	31
3.3.11 MAINELES Y TRACERÍAS DE LAS CAPILLAS DE LA GIROLA	32
4. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN	33
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN	33
4.1.1 CERRAMIENTOS	33
4.1.2 VIDRIERAS	33
4.1.3 TECHUMBRE DE LA CATEDRAL	35
4.1.4 SUELO DE LA CATEDRAL	35
4.2 CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN	35
5. CONDICIONES EXTERIORES DE CÁLCULO	41
6. CONDICIONES INTERIORES DE CÁLCULO	43
7. CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS	45
7.1 CARGA TÉRMICA POR TRANSMISIÓN DE CALOR	45
7.2 CARGA TÉRMICA DE VENTILACIÓN	46

7.3 RESULTADOS	47
8. CÁLCULO Y DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN	49
8.1 CÁLCULO Y DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN DE BAJA TEMPERATURA	49
8.2.1 INSTALACIÓN DE SUELO RADIANTE	50
8.2.2 INSTALACIÓN DE RADIADORES EN LOS BANCOS	62
8.2 CÁLCULO Y DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN DE ALTA TEMPERATURA.....	67
8.3 CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LOS GRUPOS GENERADORES DE CALOR.....	76
8.3.1 GRUPO GENERADOR DE CALOR DE BAJA TEMPERATURA.....	76
8.3.2 GRUPO GENERADOR DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA.....	76
8.3.3 DESCRIPCIÓN DE LA SALA DE CALDERAS.....	77
8.3.4 CHIMENEA	79
8.4 VASOS DE EXPANSIÓN	80
8.4.1 VASO DE EXPANSIÓN DE LA INSTALACIÓN DE BAJA TEMPERATURA.....	80
8.4.2 VASO DE EXPANSIÓN DE LA INSTALACIÓN DE ALTA TEMPERATURA.....	83
9. ENERGÍA SOLAR.....	85
9.1 COLECTOR SOLAR PLANO.....	87
9.2 COLECTOR DE TUBOS DE VACÍO.....	87
10. PRESUPUESTO	89
10.1 PRESUPUESTO DE BAJA TEMPERATURA	89
10.2 PRESUPUESTO DE ALTA TEMPERATURA.....	90
11. APROXIMACIÓN NUMÉRICA DEL PERFIL DE TEMPERATURAS EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL	93
11.1 SIMULACIÓN DEL CALOR EN EL INTERIOR DEL CALOR CON EL PROGRAMA <i>THERM</i>	93
11.2 PERFIL DE TEMPERATURAS EN LOS CERRAMIENTOS (<i>ABAQUS CAE</i>).....	95
12. CONCLUSIONES.....	99
13. BIBLIOGRAFÍA	103

Índice de Tablas

Tabla 1: Condiciones exteriores del proyecto de calefacción	41
Tabla 2: Resumen de las Cargas térmicas	47
Tabla 3: Necesidades de Tubo	52
Tabla 4: Método Polytherm, sistema clásico	53
Tabla 5: Resumen de resultados de Suelo Radiante	53
Tabla 6: Pérdidas de carga de cada circuito de cada región	54
Tabla 7: Bombas de la instalación de suelo radiante	62
Tabla 8: Potencia de los radiadores	64
Tabla 9: Coeficientes de rozamiento de tuberías de cobre	66
Tabla 10: Resumen de resultados de la instalación de radiadores de BT	66
Tabla 11: Capacidad de la instalación de suelo radiante	82
Tabla 12: Capacidad de la instalación de radiadores de baja temperatura	82
Tabla 13: Capacidad del secundario de la instalación de baja temperatura	83
Tabla 14: Grados-día para la localidad de León	86
Tabla 15: Valores de demanda de calefacción en términos de energía	87
Tabla 16: Resumen del presupuesto de la instalación de suelo radiante de baja temperatura	89
Tabla 17: Resumen del presupuesto de la instalación de radiadores en los bancos de baja temperatura	90
Tabla 18: Resumen del presupuesto de la instalación de alta temperatura	91

Índice de Figuras

Figura 1: Distribución de calor con distintos sistemas de calefacción	19
Figura 2: Distribución en serpentín	20
Figura 3: Distribución en doble serpentín	21
Figura 4: Distribución en espiral	21
Figura 5: Instalación monotubo	22
Figura 6: Instalación bitubo	22
Figura 7: Plano de situación: Plaza de Regla s/n, León	25
Figura 8: Mapa satélite: Plaza de Regla s/n, León	25
Figura 9: Situación de las diferentes zonas	27
Figura 10: Corte transversal de la Catedral	28
Figura 11: Vista 3D de la girola tomando como referencia el crucero	28
Figura 12: Vista 3D del Trascoro, tomando como referencia el crucero	29
Figura 13: Situación en planta de las Vidrieras	30
Figura 14: Cerramiento exterior	36
Figura 15: Cerramiento interior	36
Figura 16: Vidriera no restaurada	37
Figura 17: Vidriera restaurada	37
Figura 18: Cubierta de las naves laterales	38
Figura 19: Distribución de temperaturas en las naves bajas/laterales	38
Figura 20: Cubierta de la nave central	39
Figura 21: Distribución de temperaturas en nave central	39
Figura 22: Baldosín cerámico	39
Figura 23: Suelo de piedra caliza	40
Figura 24: Rosa de los vientos de León	41
Figura 25: Esquema simplificado de la instalación de baja temperatura	50
Figura 26: Denominación de las regiones de suelo radiante	51
Figura 27: Diagrama de pérdidas de carga en tubos Wirsbo-evalPEX I	55
Figura 28: Diagrama de pérdidas de carga en tubos Wirsbo-evalPEX II	55
Figura 29: Instalación de colectores de la Girola	56
Figura 30: Instalación de colectores del Altar Mayor	57
Figura 31: Instalación de colectores del Crucero	59
Figura 32: Instalación de colectores del Coro	60
Figura 33: Instalación de colectores del Trascoro	61
Figura 34: Radiador KLEO KLHD 2100mm en banco de 4,34 m	63
Figura 35: Radiador KLEO KLHD 2200 mm en banco de 7 m	63
Figura 36: Disposición de los bancos en la planta	64
Figura 37: Distribución de los bloques de bancos	65
Figura 38: Sección Transversal del radiador Terraline	67
Figura 39: Esquema simplificado de la instalación de alta temperatura	68
Figura 40: Distribución de los radiadores Terraline en la planta	69
Figura 41: Esquema de la instalación del 1er Ramal de Alta Temperatura	71
Figura 42: Esquema de la instalación del 2º Ramal de Alta Temperatura	73
Figura 43: Esquema de la instalación del 3er Ramal de Alta Temperatura	75
Figura 44: Localización de la sala de calderas	77
Figura 45: Diagrama conceptual de la sala de calderas	78
Figura 46: Dimensiones de las tuberías de una conexión genérica	81
Figura 47: Situación de los vasos de expansión de baja temperatura	83
Figura 48: Situación del vaso de expansión de alta temperatura	84
Figura 49: Mapa satélite: Plaza de Regla, 7	85
Figura 50: Distribución de temperaturas en el interior de la Catedral	94
Figura 51: Perfil de temperaturas en la sección	95
Figura 52: Perfil de temperaturas en la conjunción columna-suelo	96
Figura 53: Flujo de calor en la sección transversal	97
Figura 54: Flujo de calor en la cubierta de las naves laterales	97

1. Introducción

La climatización consiste en crear unas condiciones de temperatura, humedad, limpieza de aire y confort adecuadas para la comodidad dentro de los edificios. Dentro de la climatización se distingue la calefacción o climatización en invierno y la refrigeración o climatización en verano. Este proyecto realizará únicamente el estudio de calefacción para un edificio singular: la Catedral de León. Edificio singular ya que se trata de un edificio de arte gótico cuya construcción comenzó en el siglo XIII.

1.1 Antecedentes

La Catedral disponía de una antigua calefacción por gasóleo cuya caldera estaba situada bajo las capillas de la girola, y que se utiliza como sala de caldera para este proyecto. Es un cuarto de 150 m². La calefacción era por emisión de aire caliente al volumen de la fábrica. La salida de aire caliente se situaba en la solera del corredor de la girola, a la entrada de la capilla de la Virgen de la Esperanza. Este único emisor era incapaz de calentar todo el volumen de aire, por lo que únicamente, cuando estaba encendida, era consumir gasóleo y ensuciar las paredes y las vidrieras y no calentar el aire ambiente, por lo que se decidió quitarla, y centrar los esfuerzos en instalar una calefacción, también de gasóleo, en la capilla de la Virgen del Camino, anexa a la girola, que todavía, presta su servicio en el periodo otoñal e invernal [1] y [2].

1.2 Alcance

El alcance de este Proyecto Fin de Carrera es estudiar las pérdidas de carga que posee la catedral a través de sus cerramientos, solera, cubierta y vidrieras, dimensionar una instalación de suelo radiante y convencional de radiadores, selección de los equipos que harán posible la instalación y un breve presupuesto que supone la compra de estos equipos. Además como introducción a un proyecto se estudia la posibilidad de incorporar energía solar que ayude a la caldera al calentamiento de agua de la instalación de baja temperatura.

1.3 Objetivo

El objetivo de dicho proyecto es el de dotar de un sistema de calefacción a la Catedral de León, por suelo radiante clásico y una instalación de radiadores dispuestos en los bancos de la nave central y altar mayor. Estos sistemas se podrán instalar conjuntamente, compensando la totalidad de las pérdidas de calor del edificio o bien, instalar sólo uno de ellos, no compensando todas las pérdidas pero sí dotando de un ambiente de bienestar para los feligreses y turistas.

El grupo generador de calor, así como el grupo de bombas de impulsión y demás dispositivos para el correcto funcionamiento se dispondrán en el antiguo cuarto de calderas situado en la parte inferior de la girola de la Catedral.

Se realiza el método f-chart para evaluar la cobertura solar y la demanda que puede hacer frente la energía del sol. Los colectores solares se situarán en los tejados del palacio Arzobispal. Gracias a la energía procedente del sol, se consigue un ahorro en combustible en el grupo generador de baja temperatura.

Se adjuntará al proyecto de un presupuesto inicial que dé una primera idea del grueso del coste de la instalación, ya únicamente se tendrá en cuenta los elementos y dispositivos y no la mano de obra o las operaciones que en toda la planta de la catedral habrá que realizar.

Finalmente se redactarán las conclusiones y recomendaciones en base al estudio de la instalación.

1.4 Secciones

- Generalidades: se explican brevemente, conceptos sobre transferencia de calor, suelo radiante y radiadores. Se comenta el procedimiento que se va a seguir en construcción del proyecto, el tipo de instalación y la fuente de energía y se terminará haciendo mención a la normativa empleada.
- Descripción arquitectónica de la Catedral: se detalla la localización del templo y se hacen mención a las dependencias y las obras que, en su interior, guardan, así como de la descripción de las vidrieras.
- Cálculo de las cargas térmicas: se calculan los coeficientes globales de transmisión de calor a través de cerramientos, solera, cubiertas y ventanales para determinar las pérdidas de calor.
- Condiciones exteriores e interiores de cálculo: datos necesarios para dimensionar la instalación.
- Cálculo y dimensionado de la instalación: se explican y calculan las instalaciones de suelo radiante y radiadores.
- Energía solar: posibilidad de utilizar la radiación del sol para calentar el agua destinada al circuito de suelo radiante.
- Presupuesto: se hace una estimación.
- Proceso de evolución del calor en el programa *Abaqus CAE* y en *Therm* en la sección de la Catedral y comparación de resultados.
- Conclusiones: sirve como cierre del proyecto, y se concluye con la opinión personal del proyectista de qué instalación elegir.

1.5 Anexos

- Anexo 1: Conceptos de transferencia de calor. Viene a ampliar conceptos y fórmulas que si bien no están en la memoria, son importantes para comprender los fenómenos que se estarán dando.
- Anexo 2: Suelo radiante. Explica en una mayor profundidad en que se hace en la memoria.
- Anexo 3: Sistema de calefacción convencional. Se amplía la información sobre la instalación de radiadores.
- Anexo 4: Dependencias de la Catedral. Se explica, en mayor profundidad los huecos y obras de arte de cada dependencia del templo.
- Anexo 5: Vidrieras de la Catedral. Donde se explica la composición de las mismas y se detallan las tablas con sus superficies.
- Anexo 6: Energía Solar. Se detalla el proceso de cálculo del método f-chart para el cálculo de la cobertura solar.
- Anexo 7: Resultados. Se incluyen todas las tablas y resultados.
- Anexo 8: Planos y esquemas. Son necesarios para el entendimiento del proyecto. Aquellos que superen el DIN A3 se adjuntan en la carpeta del proyecto.

- Anexo 9: Metodología en Abaqus CAE y en Therm. Explica el proceso seguido en ambos programas.
- Anexo 10: Hojas de Fabricantes. Recoge las hojas de características de los equipos.

2. Generalidades

2.1 Conceptos previos

2.1.1 Fundamentos de Transferencia de Calor

La transferencia de calor abarca una amplia gama de fenómenos físicos que hay que comprender antes de proceder a desarrollar la metodología que conduzca al diseño térmico de los sistemas correspondientes.

Es importante recordar que cuando hay una diferencia o gradiente de temperaturas (magnitud potencial) la energía se trasladará de la zona más caliente a la más fría hasta llegar a un equilibrio térmico. La energía en tránsito, de naturaleza microscópica, es el calor.

Los tres mecanismos existentes en la transferencia de calor son conducción, convección y radiación. Más información sobre la transferencia de calor se incorpora en el *Anexo 1: Conceptos de transferencia de calor*. [12]

2.1.2 Sistema de calefacción por suelo radiante

La calefacción por suelo radiante consiste en una tubería empotrada en la capa de mortero que discurre por toda la superficie del local a calefactar. Esta tubería conduce agua caliente (a baja temperatura respecto a otros sistemas de calefacción) producida por un grupo generador de calor: grupos de calderas y/o colectores solares.

El agua cede calor al suelo a través de la tubería y el suelo, a su vez, lo transmite al ambiente del edificio, por tanto la potencia calorífica emitida al ambiente es un porcentaje menor de la total generada debida a las pérdidas que originan el paso de los materiales.

Dicho sistema, permite cualquier fuente de calor tanto de baja como de alta temperatura, con cualquier tipo de energía (gas, gasóleo, bomba de calor, paneles solares, biomasa etc.). La energía más económica en cada momento.

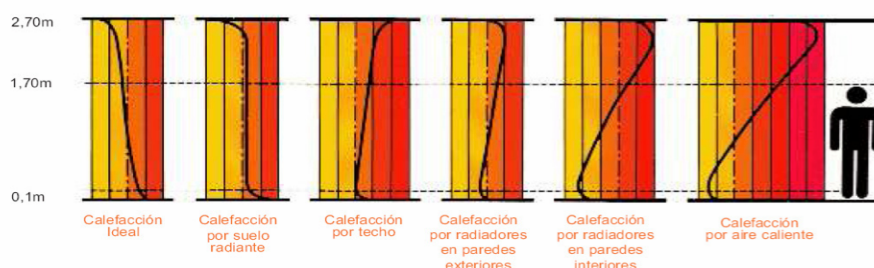


Figura 1: Distribución de calor con distintos sistemas de calefacción

La Figura 1 muestra que la calefacción por suelo radiante es un sistema racional que nos mantiene los pies calientes y la cabeza despejada, ya que el calor se emite desde abajo y el aire caliente se va enfriando a medida que se va separando del suelo. Lo que permite calentar la zona habitable y no los techos como ocurre con el resto de los sistemas. Al calentar el suelo, proporciona al local de una gran inercia térmica, pues mientras éste se encuentre a una temperatura

más alta que el aire ambiental, seguirá habiendo fenómenos de transferencia de calor.

Este sistema de climatización, es radiante porque la mayoría de su emisión se hace por irradiación, aunque también trabaja por conducción, desde los tubos, terreno y suelo, y por convección. Por todo esto, se considera que no siendo el sistema ideal, es el que más se le aproxima.

Las principales ventajas que ofrece la instalación de suelo radiante son distribución ideal de la temperatura, estética, libertad de elección de suelo, no ensucia las paredes, ofrece unas garantías de seguridad, es ecológico, mantiene una temperatura uniforme en todo el local, considera la calefacción más confortable y saludable ahorrando energía.

Los elementos de los que se compone la instalación de suelo radiante son el forjado, panel aislante, grapas de sujeción y grapadora de montaje, tubería, banda perimetral, aditivo fluidificante y retardante, sistema de colectores, accesorios adicionales necesarios para la instalación y el correspondiente sistema de regulación.

Para conseguir un reparto uniforme del calor a lo largo de las superficies a calentar, se pueden utilizar varios sistemas de distribución de los tubos en el suelo.

Distribución en serpentín

La distribución del tubo empieza por un extremo del local y termina en el extremo opuesto avanzando en líneas paralelas equidistantes unas de otras. Esta distribución es la más sencilla pero presenta un gran inconveniente, aunque proporciona una cantidad de tubo por metro cuadrado idéntica en cualquier punto del local, el reparto del calor no es igual ya que el agua se va enfriando a lo largo del circuito. Una representación esquemática se puede ver en la Figura 2.

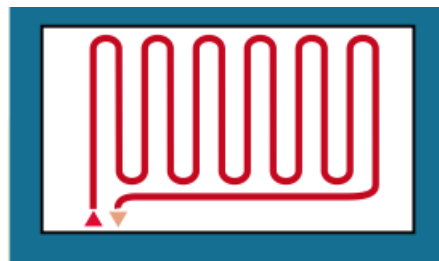


Figura 2: Distribución en serpentín

Distribución en doble serpentín

Al igual que la distribución en serpentín, se va de un extremo a otro avanzando en líneas paralelas equidistantes unas de otras pero dejando huecos donde van colocadas las líneas de retorno hasta llegar otra vez al punto de partida. Esta distribución elimina el inconveniente mencionado anteriormente y se adapta perfectamente a locales irregulares o alargados (Figura 3).

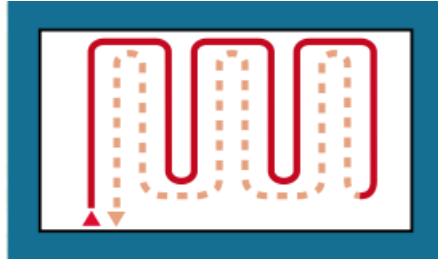


Figura 3: Distribución en doble serpentín

Distribución en espiral

Como su nombre indica, se realiza en forma de espiral de forma cuadrada o rectangular empezando por un extremo avanzando de fuera a dentro dejando huecos para volver al punto de partida al llegar al centro del local. Este sistema iguala perfectamente la temperatura del suelo ya que se alterna un tubo de ida y otro de retorno (Figura 4). [15] [24].

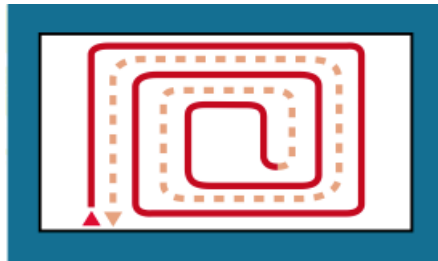


Figura 4: Distribución en espiral

Para más detalle se encuentra el *Anexo 2: Suelo Radiante*.

2.1.3 Sistema de calefacción convencional

La instalación de calefacción por radiadores es la más habitual y la que comúnmente se instala en viviendas, aunque la Basílica de san Isidoro de León incorpora estos elementos en los bancos y sirve de idea para desarrollar este proyecto. El fenómeno de transferencia de calor principal es la convección desde la superficie del radiador hacia el local que se quiere calentar. Aunque el nombre de los emisores sean radiadores, el efecto radiante no es tan importante.

Los radiadores se localizan en puntos determinados del local, trabajando a temperaturas medias que en ningún caso deben superar los 80°C (RITE ITE02.4.11).

La circulación del aire en la estancia se produce por convección. Se calienta el aire en las proximidades del radiador y comienza un ascenso a las zonas altas de la estancia. Al enfriarse en su recorrido, el aire baja nuevamente volviendo a pasar por el radiador.

Influye mucho en la circulación del aire que el radiador se encuentre parcial o totalmente tapado por un muro y algún accesorio decorativo.

Cuanta mayor superficie emisora de calor, más confort.

La potencia calorífica que emiten los radiadores depende de la temperatura del agua que llega desde las calderas, el caudal que circula por el interior y de la temperatura ambiente del local en donde se encuentra. Esta potencia cubrirá todas las necesidades del edificio cuando las temperaturas exteriores sean muy bajas.

Al dimensionar la instalación para unas condiciones críticas de temperatura, generalmente no se alcanzará la potencia máxima disponible, sino que la necesaria será menor. Esto conlleva a incorporar un sistema de regulación para adaptar la potencia emisiva a las condiciones exteriores de cada momento.

Las dos formas de conectar los radiadores entre sí son monotubo, en la que todos los elementos estarán conectados en serie (Figura 5), o bitubo, en la que estarán en paralelo (Figura 6). Dentro de este tipo de instalación y dependiendo desde donde esté dirigido el retorno se encuentran de retorno directo o simple y retorno invertido. [21]

En el *Anexo 3: Sistema de calefacción convencional* se amplía esta información.

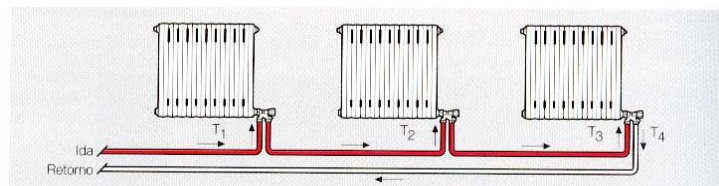


Figura 5: Instalación monotubo

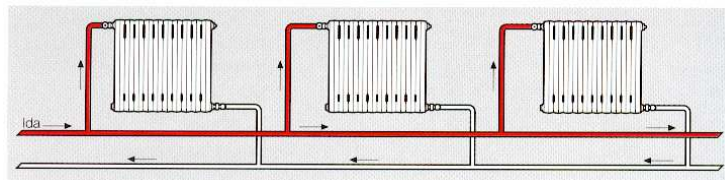


Figura 6: Instalación bitubo

2.2 Procedimientos e instalación

Para la realización de dicho proyecto, partiendo de los planos de la Catedral y de su localización, se aplicarán los métodos y normativa vigente para calcular adecuadamente la potencia térmica máxima de la instalación.

Se realiza un balance energético del edificio para obtener las necesidades caloríficas y estimar el valor de carga térmica máxima. Para poder obtener este valor, se hace necesario fijar las condiciones interiores y las peores condiciones ambientales en el exterior. Una vez realizado y comprobado este cálculo se procede al dimensionado y cálculo del sistema de suelo radiante clásico y a la instalación por radiadores para hacer frente a todas las pérdidas. Finalmente, se procede a la elección y justificación de los equipos de ambas instalaciones.

Por tanto, los pasos genéricos que se van a seguir para la estimación de la instalación de la calefacción en la Catedral serán:

- Cálculo de los coeficientes de transmisión a través de los cerramientos y techos de las naves.
- Cálculo del valor de la carga térmica necesaria para la instalación de calefacción a partir de unas condiciones interiores que vienen descritas en la norma NBE-CT_79 y en el CTE-HE1.
- Dimensionado de la instalación de suelo radiante clásico para hacer frente a la mayor potencia térmica sin poder hacer frente a toda ella, pero obteniéndose una sensación de confort la parte baja.
- Dimensionado de la instalación de radiadores para hacer frente al resto de la demanda energética del edificio.

- Especificación y justificación de los distintos equipos.
- Estimación de un presupuesto del proyecto.

Para el cálculo de los coeficientes de transmisión se construye una hoja Excel para estimar los de las paredes. Sin embargo, la techumbre y debido a su construcción abovedada, arcos típicos del Gótico, se hace necesaria la utilización del programa THERM, que permite obtener el valor del coeficiente de transmisión en secciones irregulares.

Para el cálculo de las cargas térmica, mediante una hoja Excel, se tendrá en cuenta las condiciones constructivas de la Catedral, así como las condiciones ambientales del emplazamiento.

El dimensionado de la instalación de suelo radiante se realiza mediante una hoja Excel siguiendo el manual de instalación para suelo radiante clásico de la empresa Polytherm.

El dimensionado de la instalación de radiadores se realiza mediante una hoja Excel, partiendo de la situación que plantea el proyectista en los bancos del altar mayor y crucero, y los emisores de calor colocados al ras de la solera de la Catedral, en el perímetro de la misma.

Posteriormente se procede al cálculo de un presupuesto de ambas instalaciones. Se realizan, por separado, el presupuesto de alta temperatura y el de baja temperatura.

Se acompaña al cálculo e instalación una simulación por ordenador de la evolución del calor en el interior del templo y observar qué ventanales son los más afectados debido a la emisión de calor desde el suelo radiante.

2.2 Tipo de instalación

La instalación que se proyecta para la climatización del edificio es del tipo suelo radiante clásico y radiadores, los cuales actúan como calefacción alimentado mediante un grupo generador de calor consistente en varias calderas de condensación (para baja temperatura) y una caldera de biomasa (alta temperatura), ubicadas, ambas en sala de calderas en la parte inferior de las capillas que rodean a la girola. La impulsión del caudal de agua necesario para abastecer las dos instalaciones se hará mediante grupos de bombas ya que se plantea una sectorización de la planta, y cada una de ellas lleva asociada su bomba de impulsión.

2.3 Fuente de energía

El agua se calentará gracias a un grupo generador de calor constituido por calderas de condensación que usan como fuente de energía gas natural para la instalación de baja temperatura, y caldera de biomasa para la instalación de alta temperatura, en forma de pellets: pequeños trozos de serrín prensado y compactado con una resina de carácter natural. Se deben usar dos grupos generadores de calor debido a que se proyectan dos instalaciones, de baja y alta temperatura. Además se proyecta la posibilidad de utilizar el sol para calentar el agua de la instalación de suelo radiante lo que conlleva a un ahorro en gas natural. Gracias a la utilización de la biomasa y energía solar, la Catedral de León se une, de

esta forma, a la Basílica de San Isidoro, situada en la misma ciudad de León en la utilización de las energías renovables en iglesias.

2.4 Potencia total instalada

Para el correcto funcionamiento de la instalación, se realizará previamente el cálculo de pérdidas de carga en los meses más fríos reflejado en el 7 “Cálculo de cargas térmicas”. Una vez conocidas estas pérdidas se podrá dimensionar tanto la instalación de emisores como del grupo generador de calor. En este proyecto, estos valores serán de -1.142.913,703 W para las pérdidas de carga en los meses fríos del año.

2.5 Reglamento y normativa aplicada

Previo a cualquier cálculo se debe tener en consideración diferentes aspectos relativos a la normativa de aplicación vigente:

- Reglamentación Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE):
 - ITE02.2 La temperatura que se debe alcanzar en el interior del edificio debe estar entre 21°C y 23°C.
 - Quedan prohibidas las calderas de carbón y deben tener un rendimiento superior al 90%.
 - ITE02.6. Fraccionamiento de potencia. Solamente se podrán instalar grupos generadores de calor que proporcionen como máximo 400 kW. Si es necesario más potencia, los grupos se conectarán hidráulicamente en paralelo y estarán independizados.
- Código Técnico de la Edificación, Ahorro Energético 1 (CTE-HE1): cuanto más fría sea la localidad donde se va a situar la instalación, mayor aislamiento debe tener. (el único aislamiento del edificio en cuestión son los propios muros de piedra y los tejados la cámara de aire que se deja por construcción). España está dividida en zonas climáticas (I la más cálida y V la más fría). León, lugar de la instalación, pertenece a zona V.
- Código Técnico de la Edificación, Salubridad 3 (CTE-HS3): relativo a pérdidas de renovación e infiltración, que dictan la calidad de aire que debe tener un espacio interior
- Para calderas de potencia mayor de 70 kW, debe haber un sitio en el bloque de viviendas dedicado, exclusivamente, a su instalación.
- Según directiva 92/42 CEE, las calderas estándar utilizan para la producción de agua caliente trabajando a una temperatura constante del agua de salida entre 70°C y 90°C.
- Norma UNE 60-601, sobre distribución y dimensión de la sala de calderas.
- Norma EN13384-1 y EN13384-2, sobre el dimensionado de la instalación de la chimenea en caldera normal y centralizada, respectivamente.

3. Descripción arquitectónica

3.1 Situación y geometría de la Catedral

Se proyecta el estudio de calefacción sobre la Catedral de Santa María de Regla, localizada en la plaza de Regla s/n de la localidad de León (Figura 7 y Figura 8). El edificio es una Catedral gótica del siglo XIII compuesta por una nave central de 30 metros de altura y dos filas de naves laterales que se encuentran a 11,5 metros. Las dos filas de naves laterales se unen entre sí a través de una girola, dispuesta, también a 11,5 metros. Alrededor de la girola se encuentran 5 capillas a la misma altura que esta última. Por último, en los laterales del altar mayor, pasado el crucero, se encuentran dos capillas adicionales.

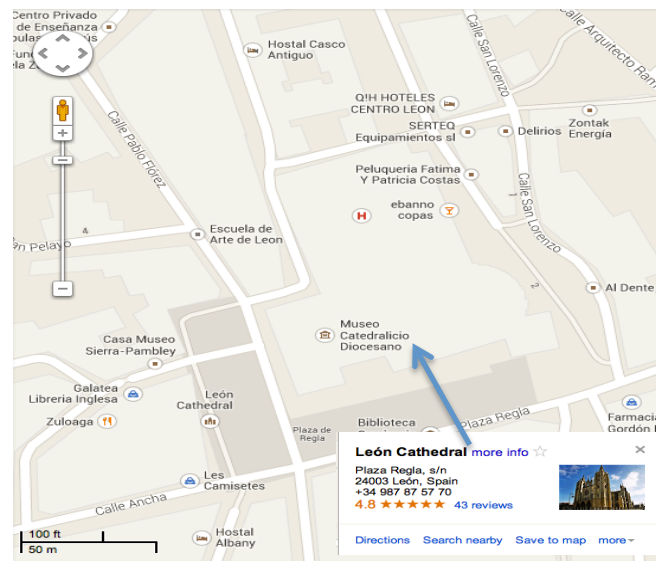


Figura 7: Plano de situación: Plaza de Regla s/n, León



Figura 8: Mapa satélite: Plaza de Regla s/n, León

Las dependencias que se van a calentar son el hueco existente de naves centrales, naves laterales, pasillo y capillas de la girola y laterales. En las naves centrales se encuentran el altar mayor y el crucero.

Las dimensiones de la Catedral son de 90 metros de larga, 29 metros de ancha y 30 metros en las naves más altas y 11,5 metros en las naves laterales y capillas de la girola. El resto de elementos, como torre sur y norte, capilla de Nuestra Señora del Camino, claustro no se consideran pues el cálculo, dimensionado e instalación comprende, únicamente a las estancias citadas anteriormente.

Se definen para el cálculo y su nombramiento a partir de aquí de cinco regiones.

- Girola: que comprende las cinco capillas y el corredor circular de detrás del altar mayor más la capilla del Santo Cristo que, si bien no está en la girola propiamente dicho, se encuentra aledaña a la presacristía (capilla de la girola). La superficie total de esta zona son 1392,811 m².
- Altar mayor: la zona que va desde la girola hasta el crucero. Esta zona se encuentra dividida en 3 subzonas:
 - Altar mayor 1: comprende la capilla de Santa Teresa y su pasillo cuya área son 746,933 m².
 - Altar mayor: es la nave central del altar mayor, donde se encuentra el altar y la mayoría de los bancos para atender a la celebración de la Eucaristía. La superficie que se debe tener en cuenta son 664,88 m².
 - Altar mayor 2: superficie de igual tamaño que el altar mayor 1, comprende la capilla del Carmen y su corredor correspondiente.
- Crucero: zona comprendida entre el altar mayor y el coro. Es la región horizontal de la Catedral, también se encuentra dividida en tres subzonas denominadas Crucero 1, Crucero y Crucero 2, siendo la primera y última de ellas de igual superficie. En esta zona también se encuentran bancos. El valor de la superficie son 328,197 m², 634,126 m² y 328,197 m², respectivamente.
- Coro: como su propio nombre indica, comprende el coro de madera de roble de la Catedral, característico de las Catedrales nacionales que se encuentre en frente del altar mayor y no detrás de él como ocurre en las catedrales góticas francesas. Es la dependencia tomada más pequeña pues su área son 165,184 m².
- Trascoro. Zona situada entre la entrada oeste de la catedral y el coro. Dividida, también tres regiones denominadas trascoro 1, trascoro y trascoro 2. Los valores de las superficies son, respectivamente: 578,83 m², 599,787 m² y 578,83 m².

Para una mayor definición y clarificación de las regiones se incorpora la Figura 9 que muestra el posicionamiento de todas estas dependencias.

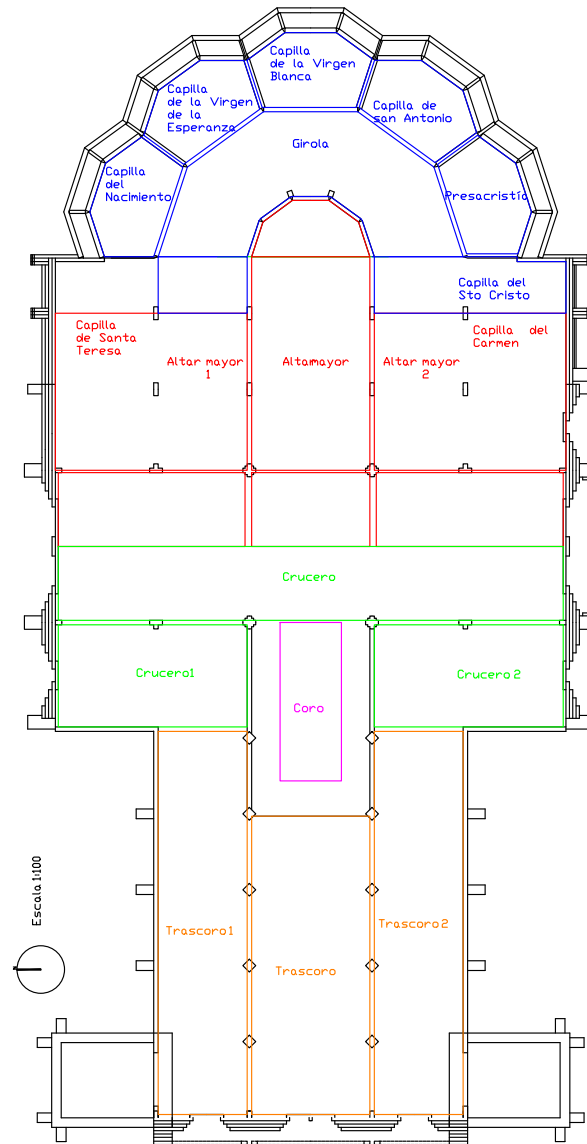


Figura 9: Situación de las diferentes zonas

3.2 Descripción de las dependencias de la Catedral

Es importante abrir este apartado dentro del capítulo de características de la Catedral porque, al no ser un edificio convencional, hay obras de arte, tales como frescos, escultura e imaginería, que hay que tener en cuenta a la hora de hacer el estudio de la calefacción y su posible afección.

La catedral de León, como se ha mencionado, dispone de diversas estancias que guardan en su interior obras de arte que deben ser consideradas para mantener un ambiente adecuado, en las condiciones óptimas de temperatura y humedad relativa que tanto afectan a la piedra caliza, sobre todo a la de Hontoria, como a las esculturas de arte funerario extendidas a lo largo de toda la fábrica, especial interés tiene el sepulcro de Ordoño II ya que se encuentra esculpido y policromado, todo el trascoro tallado en alabastro, la virgen Blanca, imágenes en madera policromada como en la capilla del Nacimiento, capilla de la Virgen de la Esperanza, en la capilla de san Antonio o la sillería del coro esculpida a golpe de gubia en madera de nogal y barnizada, grandes frescos en los muros del transepto

septentrional y meridional y los situados en las paredes del ábside, detrás del altar Mayor; el retablo del altar mayor y los retablos de las capillas del Santo Cristo, de la Virgen del Carmen o de Santa Teresa, entre otras obras de arte que se comentan en más detalle en el *Anexo 4: Dependencias de la Catedral de León*, donde se hace un recorrido por cada dependencia y se describe en mayor profundidad. En la ilustración se puede ver un corte transversal de la sección de la Catedral donde se observan las dependencias a calefactar. [1] y [2].

En la Figura 10 se puede ver una sección transversal de la Catedral en donde se distinguen las secciones comentadas.

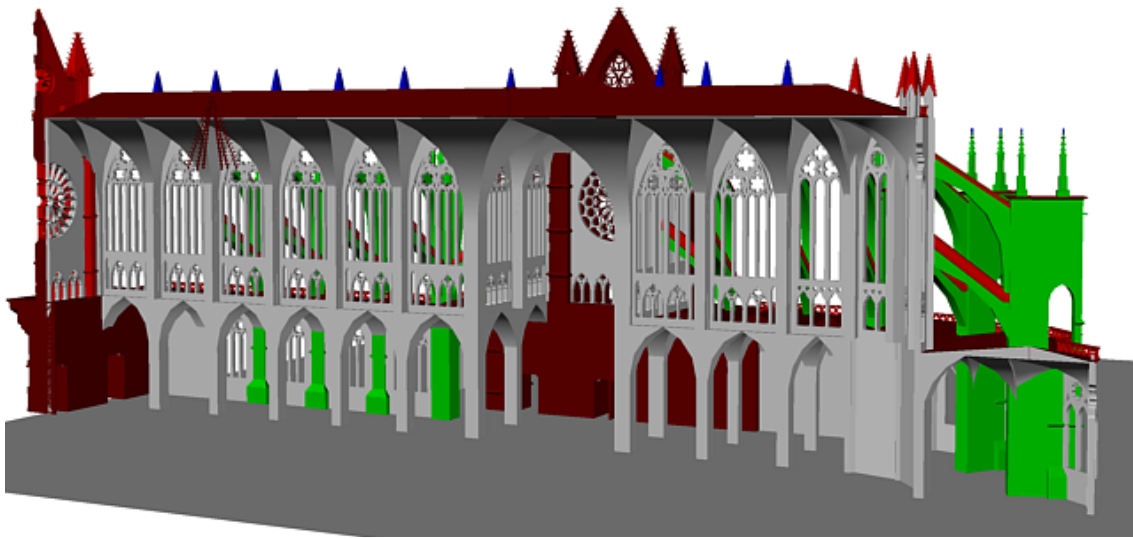


Figura 10: Corte transversal de la Catedral

Las dos ilustraciones que a continuación aparecen vienen a mostrar la zona de la girola y la zona del trancoro, respectivamente, tomando como punto de vista el crucero.

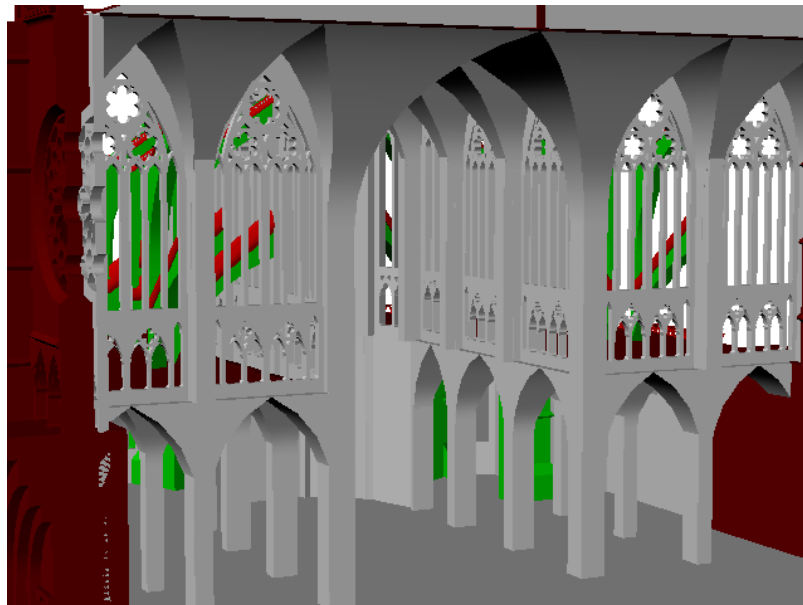


Figura 11: Vista 3D de la girola tomando como referencia el crucero

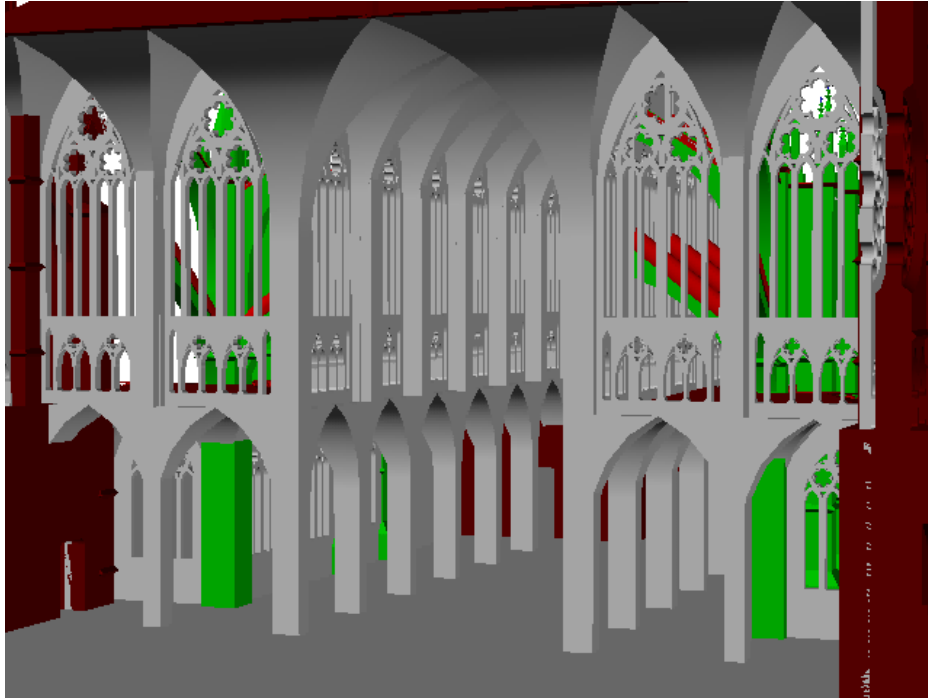


Figura 12: Vista 3D del Trascoro, tomando como referencia el crucero

3.3 Caracterización de las vidrieras

Se hace una breve descripción de los diferentes tipos de ventanales o vidrieras de las que se compone. Los 1900 m² de vidrio que proporcionan a la Catedral de luz y ligereza (se sustituye la piedra del Románico, por huecos y esbeltez en el Gótico). Gracias a toda esta superficie vidriada, la Catedral recibe el nombre, también de Catedral de la Luz.

Es importante destacar que las vidrieras son muy frágiles y sensibles a los agentes atmosféricos, la contaminación, los impactos fortuitos y las agresiones humanas. Los vidrios medievales sufren entre otras patologías la corrosión manifestada en forma de costras opacas y cráteres que causan su descomposición. Aunque a finales del siglo XIX se acometió una restauración del conjunto de ventanales, recuperando las medievales y completando las desaparecidas, en lo que significó el renacer de un arte casi olvidado desde el Renacimiento y la conservación del más excepcional conjunto de vidrieras de nuestro país.

La actual campaña de restauración se basa en el criterio de restauración preventiva, asegurando tanto la estabilidad del vidrio como del resto de elementos integrantes de la obra, alejando a las vidrieras de los agentes nocivos, lo que detiene su deterioro.

Dentro de todo el grupo de ventanales se pueden distinguir vidrieras que no han sufrido proceso de restauración, aquéllas que lo han tenido entre los años 1993 y 2004 y aquéllas que están en pleno proceso. Es importante destacar que las que no han sufrido restauración se tratan de una manera diferente de las que sí lo han experimentado, hablando en términos térmicos y constructivos. Ambos grupos tendrán distinto coeficiente de transmisión.

En la Figura 13, se puede observar un plano de la distribución de las vidrieras, donde los diferentes colores muestran qué ventanales han sufrido restauración y cuáles no.

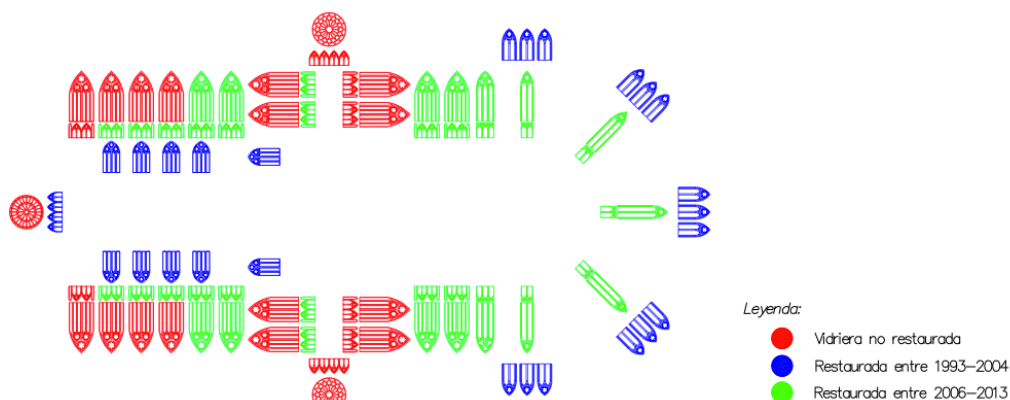


Figura 13: Situación en planta de las Vidrieras

Uno de los procesos de caracterización más importantes es averiguar la superficie real de vidrio existente en todos los muros de la Catedral. El proceso seguido para obtener esta superficie de los vitrales ha sido el siguiente: se ha extrapolado cada tipo de vidriera al programa *AutoCad*. La forma aproximada de cada vidriera se obtiene tras un análisis y dibujo previo de cada una. Posteriormente este análisis se plasma en el programa de ordenador y con la función área, que lleva implementada el programa, y, haciendo un correcto uso de las escalas, se obtiene que el área total de vidrieras es 1900 m².

3.3.1 Ventanales altos

Cada vidriera de este tipo se compone de cuatro huecos, dos lancetas y tres rosetas. Es la vidriera más grande de las existentes, pues su altura es de 12 metros. En el templo existen 24 ventanales altos que rodean las naves altas. Ocho de ellas están restauradas, mientras que el resto están esperando dicho proceso de restauración. Los 24 ventanales altos aportan 884,265 m².

3.3.2 Ventanales altos del presbiterio

Las dos vidrieras de este tipo se encuentran en las naves altas entre los ventanales altos de las naves y las vidrieras del ábside. Hay una en dirección sur y otra en dirección norte. Miden también 12 metros de altura y están compuestas por tres huecos y tres rosetas. Todas se encuentran restauradas. Cada una tiene una superficie vidriada de 27,062 m².

3.3.3 Ventanales altos del centro del ábside

Cinco son las vidrieras que componen este grupo. Se encuentran sobre el altar mayor rodeando el ábside de la Catedral. Miden 12 metros de alto y están compuestos por dos huecos y una roseta cada uno. Al estar colocados en dirección noroeste, este y sureste, dan una sensación de abrazo por su forma semicircular. Todas están restauradas. Cada una de las vidrieras tiene una superficie vidriada de 22,316 m², aportando, en conjunto, 111,579 m².

3.3.4 Rosetón oeste

Como su nombre indica está dispuesto en la fachada oeste de la Catedral, y es el encargado de recibir los últimos rayos del sol del día. El más rico de los 3, tanto en formas como en huecos, este único elemento de la catedral mide 8 metros de diámetro. Sus 39,111 m² todavía no han sido restaurados.

3.3.5 Rosetón sur y norte

Cada uno de ellos mide 8 metros de diámetro, al igual que el rosetón oeste, pero la distribución de los huecos es similar entre ellos pero distinta a la de aquél. El rosetón sur está más desgastado por el efecto del sol, pues al otro nunca le llegan los rayos directamente; sus 75,983 m² totales esperan a ser restaurados.

3.3.6 Triforio de las naves laterales

Dispuestos debajo de los ventanales altos, estas 24 vidrieras están formadas por cuatro huecos, dos lancetas y dos rosetas de igual tamaño en anchura que los ventanales altos. 18 de las 24 vidrieras se considerarán restauradas a efectos de cálculo. Cada uno de las 24 vidrieras que conforman todo el triforio aporta 11,221 m² de ventanal.

3.3.7 Triforio del presbiterio

Dispuestos también a los pies de los ventanales del presbiterio. Se deduce, por tanto, que únicamente hay dos vidrieras de este tipo. Cada vidriera está compuesta por 3 huecos y 6 rosetas pequeña. Característico es el arco ojival trilobado apuntado con el que termina cada hueco. Los 19,757 m² que tienen en total los dos triforios se encuentran restaurados.

3.3.8 Triforio del ábside

De igual forma que el triforio del presbiterio, a excepción que está compuesto de 2 huecos y 4 rosetas pequeñas. Al estas debajo de los ventanales del ábside, es fácil comprobar que hay 5 vidrieras de este tipo. Al igual que el triforio del presbiterio, las cinco se encuentran restauradas. Las cinco triforios del ábside tienen, cada uno, 6,586 m².

3.3.9 Triforio de los rosetones

Situados debajo de cada rosetón, están formados por 8 huecos y 4 rosetas de 4 pétalos cada uno. Únicamente el triforio del rosetón oeste se encuentra restaurado. Junto con los rosetones, son lo más destacado de cada portada de la Catedral. Cada triforio de las tres portadas cuenta con 17,239 m².

3.3.10 Maineles y tracerías de las naves bajas

Dispuestas en las naves bajas de la Catedral, estos 10 elementos conducen hasta el altar mayor. Restauradas en su totalidad entre los años 1993 y 2004, están compuestos por 4 huecos y 3 rosetas cada uno. Tras de los ventanales altos, los maineles y tracerías de las naves bajas son los que más aportan en cuanto a superficie vidriada. La superficie vidriada total de este tipo son 170,419 m².

3.3.11 Maineles y tracerías de las capillas de la girola

Las 15 últimas vidrieras se dividen en las 5 capillas que rodean el ábside y que forman la girola de la Catedral. Cada una se compone de dos huecos y una roseta en la parte alta. Tienen la misma altura que los maineles y tracerías de las naves bajas, anteriormente citados. Todas ellas han sufrido el proceso de restauración. Suman 190,959 m² de vidriera en la zona este de la Catedral. [1] y [2]

Más información acerca de cómo se encuentra divididas los huecos en las vidrieras se disponen en el apartado A5.2 del *Anexo 5: Vidrieras de la Catedral de León* y los planos de las vidrieras se disponen en el *Anexo 8: Planos y Esquemas*.

4. Cálculo de los coeficientes de transmisión

Uno de los apartados más importantes del documento, porque con el cálculo del coeficiente global de transmisión podremos obtener las pérdidas que tiene la Catedral y así disponer de la caldera necesaria, así como de las correspondientes instalaciones de suelo radiante e instalación convencional.

4.1 Descripción de los elementos de construcción

4.1.1 Cerramientos

Las paredes de la Catedral de León están constituidas por sillares relativamente regulares de origen calizo. Los tipos de roca presentes en la fábrica de la catedral de León son: dolomías cristalinas (piedra procedente de Boñar), piedras margosas (piedras del país) y calizas bioclásticas (piedra de Hontoria). Estos tres tipos de piedra están repartidos por los diferentes componentes de la Catedral, así pues se puede observar que la piedra de Boñar se encuentra en la mayor parte de la iglesia: torre, hastial y arbotantes del sur, torre de la Limona, el claustro y el exterior de las capillas. La piedra del País aparece, entre otras zonas, en la torre y arbotantes del Norte, pórtico y hastial oeste y en el interior del templo. Por último, la piedra de Hontoria, menos presente en la catedral, y de más reciente utilización en las obras de restauración, aparece en balaustradas, ventanales, barandillas y otros adornos menores.

Gracias a los arbotantes, que son los que reparten el peso de la fábrica, el espesor de los muros es de simplemente de 40 cm. Se podría decir que los muros están para soportar el peso de las vidrieras y hacer de cerramientos. Para simplificar los cálculos, se toma como conductividad térmica la de la piedra caliza, ya que se compone, principalmente, de ésta. Para obtener la demanda de calor, la conductividad de la piedra caliza es de 2,2097 W/mK.

Los cerramientos interiores no juegan un papel relevante, porque todo el espacio a calefactar se encuentra, en los cálculos, a la misma temperatura. No obstante, los muros interiores se construyen con los mismos tipos de piedra comentados anteriormente; además se pueden ver que hay distintos materiales en el interior: alabastro para los sepulcros del crucero y de las capillas de la girola, así como para el trascoro; la sillería del coro es de madera de nogal tallada con diferentes santos de la iglesia católica; las rejas, barandillas, cerraduras y cancelos que protegen los sepulcros y cierran las capillas de la girola, excepto la presacristía (es piedra de Boñar tallada), se hacen mediante elementos de forja. También hay que considerar que hay paredes que tienen frescos pintados y que es importante mantener la catedral a una cierta temperatura y humedad suficientemente agradables para las personas pero sin que dañen estos elementos. [3], [4], [6], [8] y [9].

4.1.2 Vidrieras

Adicionalmente al apartado 3.3 “Caracterización de las Vidrieras”, surge éste que viene a describir los materiales de los que se componen los ventanales de la catedral.

Los principales componentes de las vidrieras son su contenido en sílice, su contenido en iones alcalinos y su contenido en óxido de calcio. El contenido en sílice determina el comportamiento físico químico de la vidriera. Cuanto más baja es la composición en sílice, mayor deterioro tendrá. La elevada proporción de alcalinos en la composición de las vidrieras las hace muy vulnerables. El más común de los que se solían utilizar era el óxido de sodio, aunque también era frecuente la utilización de óxido de potasio, ya que ambos se obtenían de cenizas de plantas, y los lugares donde predomina el sodio son cerca del Mediterráneo; por tanto, el óxido potásico se obtenía de cenizas de plantas de interior. El contenido de óxido cálcico suele ser muy bajo (menor del 20%).

Junto a estos tres componentes hay otros, que son una constante en la composición de la mayoría de las vidrieras: los más comunes son los óxidos de magnesio, bario, plomo, aluminio y titanio. Los que se encuentran colorados, habrá que considerar, también, los componentes de su coloración. Los más comunes son el óxido de cobalto, culpable del color azul intenso; el óxido de manganeso, se usa como colorante para producir el rosa de las carnaciones, también se utilizaba con la función de decolorante, dando color oscuro pardo; el óxido de hierro, responsable de una coloración azulada verdosa, si es óxido ferroso, o amarillenta parda, si es óxido férrico; el óxido de cobre, gracias al cual se tiene un color azul turquesa, si se combina con óxido cúprico con férrico se llega a obtener un color verdoso, por último, el cobre desempeña un papel fundamental en la creación de rojo rubí; el color amarillo intenso de las vidrieras lo suministraba los compuestos de plata.

También es muy importante que hay vidrieras, que no han sufrido ningún proceso de restauración y, debido a los agentes climáticos y al tráfico rodado, que anteriormente circulaba por los alrededores de la Plaza de Regla, se encuentran capas de grisalla que son de naturaleza vítrea. Están formadas, generalmente, por mezclas de sustancias vitrificables usando óxido de plomo como fundente. El problema es que alguna de las vidrieras que tienen esta capa de grisalla se puede encontrar desprendida debido a una mala adhesión o a diferencias de tensiones producidas por sus diferentes coeficientes de dilatación. Por último, si la capa de grisalla se encuentra corroída, el daño es irreparable.

Una vez que los vidrios están preparados se disponen sobre la plantilla (o tabla) para su emplomado. El perfil o verga de plomo se compone de un alma y dos alas. El emplomado consiste en unir las piezas cortadas de vidrio con las vergas de plomo. Un diseño irregular implica un montaje más complejo. Una vez emplomada la vidriera se sueldan las uniones de los perfiles de plomo con una aleación de plomo y estaño, quedando perfectamente unidas y siendo imposible que los vidrios se suelten. Finalmente, la vidriera queda terminada tras el enmasillado, que consiste en rellenar los huecos entre el plomo y la vidriera con una pasta o masilla para dotarla de consistencia y unidad. En el *Anexo 5: Vidrieras de la Catedral de León* se muestra con mayor detalle las composiciones de los componentes de las vidrieras.

Las vidrieras de la catedral de León se pueden clasificar en tres tipos químicos que los designamos como I, II y III. Los vidrios del Tipo III, que datan del siglo XV son claramente diferentes a los del Tipo I y II. Los tipos más tardíos se parecen químicamente entre sí aunque no son idénticos.

El Tipo III se caracteriza por su alto contenido en K_2O y CaO con tan sólo un moderado contenido de MgO , mientras que los Tipos I y II tienen un alto contenido en K_2O , medio/alto de CaO y alto MgO , a veces combinado con una alto contenido de P_2O_5 .

Al ser imposible tener en cuenta todos los componentes de las vidrieras para el cálculo de la conductividad térmica, se hace una simplificación que distingue entre vidriera no restaurada y vidriera restaurada. La conductividad del vidrio será, cualquier caso, $0,067 \text{ W/mK}$. Lo que hará diferente una de otra será que la vidriera restaurada lleva un segundo vidrio de protección y se encuentra separada del muro de piedra unos 5 mm , favoreciendo a la ventilación y a que el propio aire genere una película de protección. Además también hay que considerar que las juntas, que llamaremos marco, serán de latón (81 W/mK) en las vidrieras restauradas y de plomo (35 W/mK) en las no restauradas. [5]

4.1.3 Techumbre de la Catedral

Se pueden distinguir dos zonas de bóvedas en la Catedral. Las bóvedas de la nave central, que son más elevadas que los de la segunda zona, las de las naves laterales y capillas de la girola.

Bóveda de las naves bajas

Poseen una luz de arco que mide $7,43$ metros al comienzo. El punto más alto de la bóveda está a $11,5$ metros. El arco es de estilo gótico y se modela de esa forma cuyas capas están formadas por piedra, arlita, cuya conductividad es de $0,08 \text{ W/mK}$, que hace de medio aislante y sirve para distribuir peso; luego hay una capa de aire ($0,024 \text{ W/mK}$), vigas de madera de pino ($0,163 \text{ W/mK}$) antes de la techumbre en teja ($0,76 \text{ W/mK}$).

Bóveda de la nave central

Su punto más alto está a 30 metros de altura y la anchura del arco alcanza los 16 metros. Las capas de las cuales se compone esta techumbre son las mismas que las naves bajas pero con diferentes espesores. [2], [3], [6] y [10]

4.1.4 Suelo de la Catedral

La catedral construida encima de los cimientos de la antigua catedral de estilo Románico se compone de dos tipos de suelo de piedra caliza pulida y sin pulir (se considera a efectos de cálculo la misma conductividad que la piedra caliza) y baldosín cerámico a lo largo del pasillo que une el coro con el altar mayor. [2]

Las diferentes capas de las que se compone el suelo son baldosín cerámico de $0,67 \text{ W/mK}$ o la piedra caliza más el terreno, cuya conductividad será de 2 W/mK . Los espesores de ambas capas varía pues en conjunto deben medir 55 cm . Si el suelo es de baldosín cerámico el espesor es el propio del baldosín (5 cm) y si es de piedra será el del propio bloque, unos 25 cm . El resto será terreno. [6]

4.2 Cálculo de los coeficientes de transmisión

Para el cálculo de los coeficientes globales de transmisión para los distintos tipos de cerramientos, el Código Técnico de la Edificación establece que se calculan según la siguiente expresión:

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}}$$

donde:

h_i : coeficiente superficial de transmisión de calor interior [W/m^2K]. Viene dado por el CTE-HE1 como función de la situación y posición del cerramiento y sentido del flujo de calor a través del mismo.

h_e : coeficiente superficial de transmisión de calor exterior [W/m^2K]. Viene dado por el CTE-HE1 como función de la situación y posición del cerramiento y sentido del flujo de calor a través del mismo.

L_i : espesor de la capa de material i-ésima [m].

λ_i : conductividad térmica del material que forma la capa i-ésima [W/mK].

K_g : coeficiente global de transmisión [W/m^2K].

Así los valores de K_g obtenidos para los diferentes tipos de cerramientos son los siguientes.

- Muros exteriores.

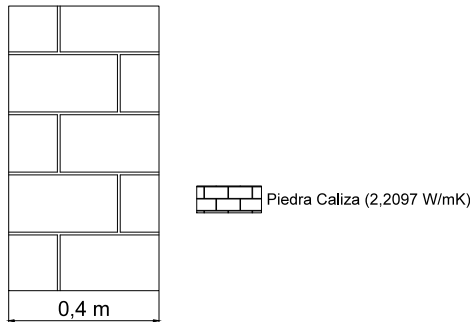


Figura 14: Cerramiento exterior

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + \left(\frac{0,4}{2,2097}\right)} = 2,84884 \frac{W}{m^2K}$$

- Muros interiores

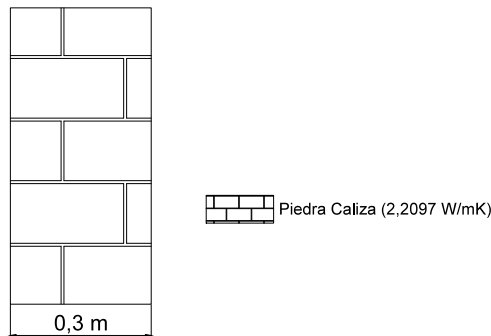


Figura 15: Cerramiento interior

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,13 + 0,13 + \left(\frac{0,3}{2,2097}\right)} = 2,52675 \frac{W}{m^2 K}$$

- Vidriera no restaurada.

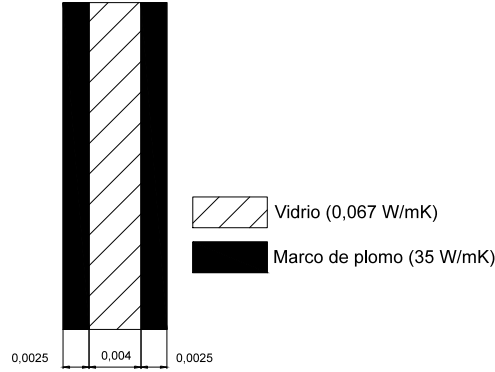


Figura 16: Vidriera no restaurada

- Vidrio:

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + \left(\frac{0,004}{0,067}\right)} = 4,35347 \frac{W}{m^2 K}$$

- Marco de plomo

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + \left(\frac{0,005}{35}\right)} = 5,877414 \frac{W}{m^2 K}$$

- Vidriera restaurada.

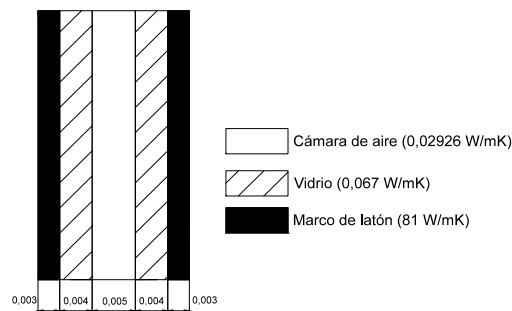


Figura 17: Vidriera restaurada

- Vidrio:

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + \left(\frac{0,004}{0,067} + \frac{0,005}{0,02926} + \frac{0,004}{0,067}\right)} = 4,35347 \frac{W}{m^2 K}$$

- Marco de latón

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + \left(\frac{0,005}{81}\right)} = 5,88022 \frac{W}{m^2 K}$$

[6], [7] y [14]

- Cubierta de las naves laterales.

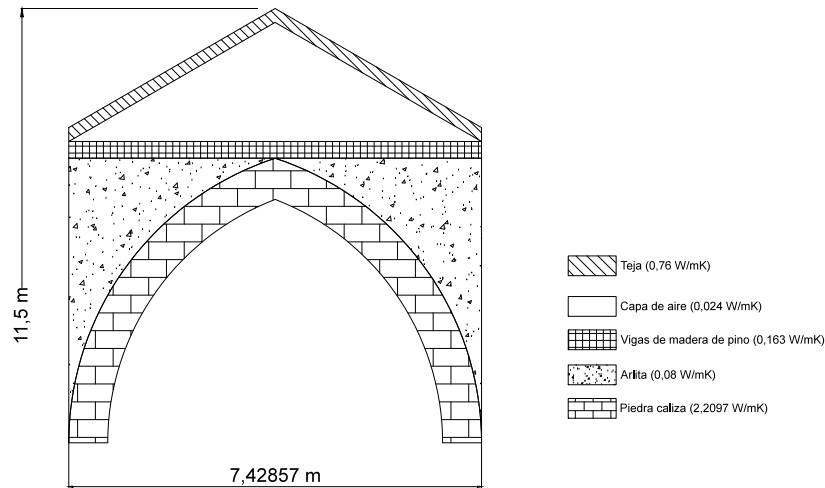


Figura 18: Cubierta de las naves laterales

Dada la forma de arco gótico, se hace necesaria la utilización del programa *Therm* para poder obtener, mediante elementos finitos, el coeficiente global de transmisión de calor. Dibujando el arco en *AutoCad*, se trabaja con él en el programa de cálculo. Se definen los materiales y se imponen las condiciones de contorno de $-3,8^{\circ}\text{C}$ fuera y dentro 21°C . Gracias a esto obtenemos que el valor del coeficiente global de transmisión es $1,0467 \text{ W/m}^2\text{K}$. En la Figura 19 se muestra la distribución de temperaturas y el flujo de calor en el arco. [6], [10] y [11]

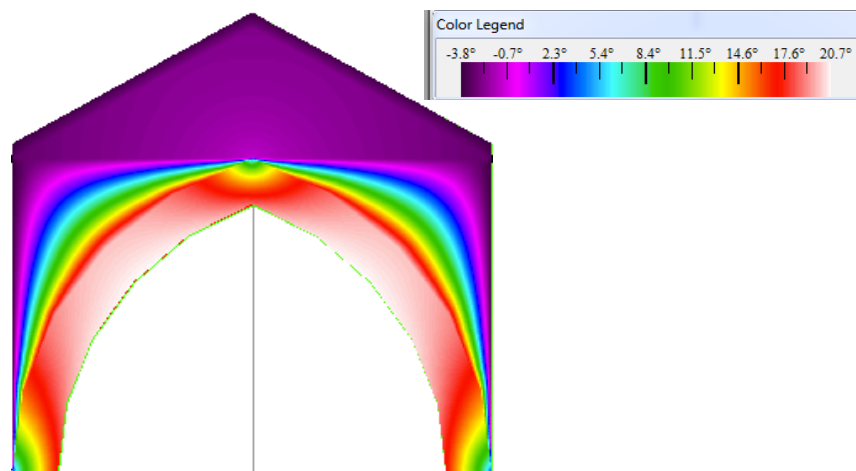


Figura 19: Distribución de temperaturas en las naves bajas/laterales

- Cubiertas de la nave central.

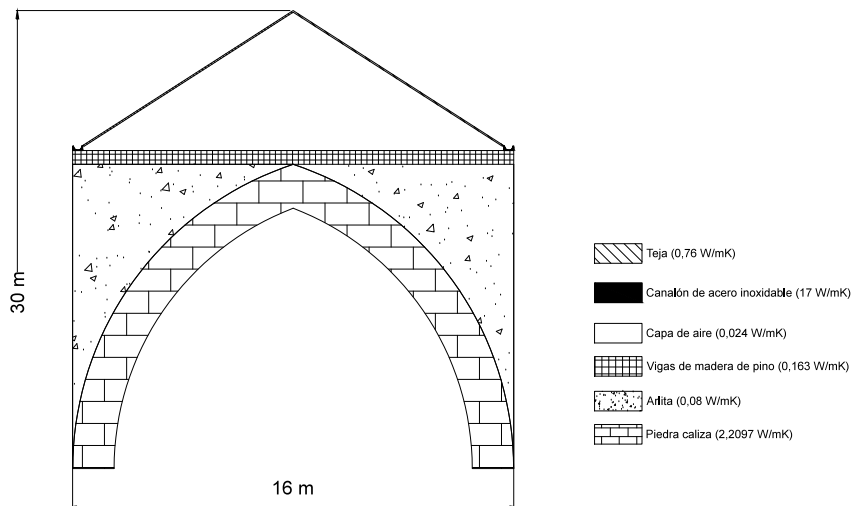


Figura 20: Cubierta de la nave central

Análogamente a la cubierta de las naves laterales, se hace necesario volver a utilizar *Therm* para poder obtener el coeficiente de transmisión de calor. Únicamente cambia el tamaño del arco y la consideración del canalón de acero inoxidable. El valor del coeficiente es de $0,2699 \text{ W/m}^2\text{K}$. De nuevo, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la distribución de temperaturas en la nave central. [6], [10] y [11]

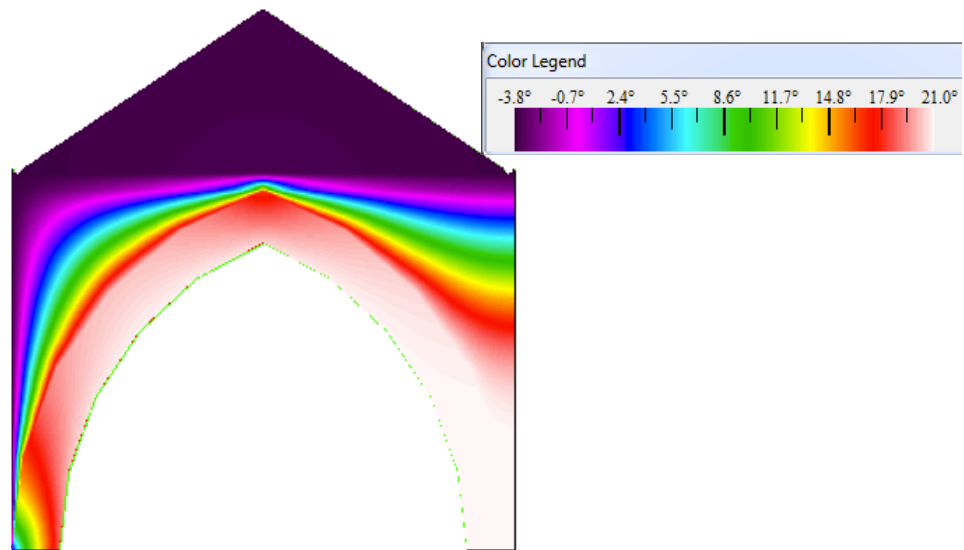


Figura 21: Distribución de temperaturas en nave central

- Forjado

- Baldosín cerámico

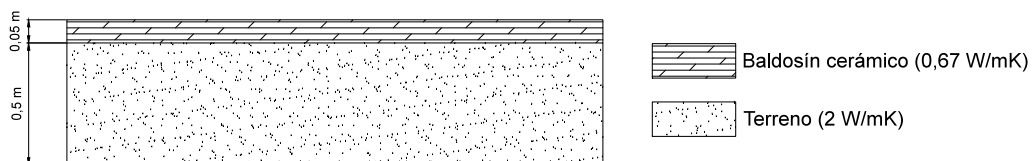


Figura 22: Baldosín cerámico

4. Cálculo de los coeficientes de transmisión

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,17 + 0,17 + \left(\frac{0,05}{0,67} + \frac{0,5}{2}\right)} = 1,504603 \frac{W}{m^2 K}$$

- Piedra caliza

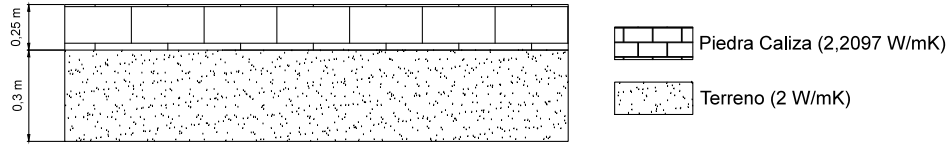


Figura 23: Suelo de piedra caliza

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{0,17 + 0,17 + \left(\frac{0,25}{2,2097} + \frac{0,3}{2}\right)} = 1,658 \frac{W}{m^2 K}$$

[6], [7] y [14]

5. Condiciones exteriores de cálculo

Se toma como fuente de información los datos suministrados en la “Guía Técnica: Condiciones climáticas exteriores del proyecto” que a su vez toman como fuente los proporcionados por la Agencia Española de Meteorología (Tabla 1).

Provincia		Estación			
León		León (Virgen del Camino)			

a.s.n.m (m)	Latitud	Longitud	T media seca	Hum. relativa	T terreno
916	42,36º	5,3º Oeste	10,9	14,601	5,838

TS _{MIN} (°C)	TS _{99,6} (°C)	TS ₉₉ (°C)	OMDC	HUMcoin(%)	OMA(°C)
9,1	-5	-3,8	11,2	89,2	36,8

Tabla 1: Condiciones exteriores del proyecto de calefacción

Cada uno de los datos anteriores significa:

a.s.n.m: altura sobre el nivel del mar de la estación donde se toman los datos.

T media seca: Temperatura seca media anual.

TS_{99,6}: Temperatura seca de León con un percentil 99,6%.

TS₉₉: Temperatura seca de León con un percentil 99%.

OMDC: Oscilación media diaria (máxima-mínima diaria) de los días en los que alguna de sus horas están dentro del percentil del 99%.

HUMcoin: Humedad relativa media coincidente (se da a la vez que se tiene el nivel de percentil 99% en TS).

OMA: Oscilación máxima anual de temperatura seca. Se define como la diferencia de temperatura seca con un nivel de percentil 0,4% respecto a la temperatura seca con un 99,6% de percentil.

$$OMA = TS_{0,4\%} - TS_{99,6\%}$$

Por último mostramos la rosa de los vientos para indicar la intensidad y direcciones predominantes del viento:

Rosa de los vientos: velocidad media 2,83 m/s

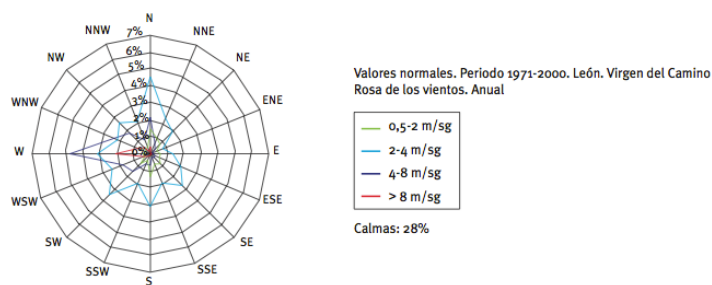


Figura 24: Rosa de los vientos de León

6. Condiciones interiores de cálculo

Al no plantear estudio de refrigeración pues la Catedral no lo necesita ya que, gracias a los muros de piedra, mantiene una temperatura en verano sobre los 20°C proporcionando una sensación de confort para feligreses y turistas.

Según el Reglamento de Instalaciones Técnicas en Edificios (R.I.T.E) en el capítulo de Instrucción Técnica en su sección 1.4.1.1, proporciona los intervalos de temperaturas y humedad relativa de las diferentes dependencias de un edificio, tanto para verano como para invierno. La Temperatura de diseño interior en invierno debe estar entre 21°C y 23°C y la humedad relativa entre 40 y 50%.

Las cargas térmicas de este proyecto se obtendrán considerando una temperatura de 21°C y una humedad relativa del 50% en todas las dependencias, ya que se considera la Catedral como un todo, donde se tendrán en cuenta las superficies de los cerramientos y la elevada altura de sus naves y capillas.

La ventilación y renovación del caudal de aire interior se hará por el movimiento que generan las corrientes de aire entre las puertas abiertas y las vidrieras restauradas, las cuales, son colocadas de tal manera que se genere una capa de aire superficial que las protege y, además, ventila la estancia.

7. Cálculo de las Cargas Térmicas

Las instalaciones térmicas deben diseñarse y calcularse, ejecutarse, mantenerse y utilizarse de tal forma que se obtenga una calidad térmica del ambiente, una calidad del aire interior que sean aceptables para los usuarios del edificio sin que se produzca un descenso de la calidad acústica del ambiente, cumpliendo según lo que refleja el RITE con los requisitos de calidad térmica, manteniendo los parámetros que definen el ambiente térmico dentro de un intervalo de parámetros determinados con el fin de mantener unas condiciones confortables para los usuarios de los edificios.

El conocimiento de las cargas térmicas de cada uno de los locales a calefactar es un paso previo para el dimensionado de la instalación. Los procesos de cálculo siguen lo especificado en el CTE-HE1 (Ahorro de energía). La carga térmica de una estancia indica las pérdidas energéticas que deben ser compensadas por el sistema de calefacción para lograr las condiciones interiores de confort deseadas.

La expresión de cálculo de la carga térmica de una estancia sigue la siguiente expresión:

$$Q = Q_t + Q_v$$

Donde:

Q : Carga térmica de calefacción [W].

Q_t : Carga térmica por transmisión de calor a través de los cerramientos, forjados y cubiertas [W].

Q_v : Carga térmica por ventilación o infiltración[W].

7.1 Carga térmica por transmisión de calor

Expresa el concepto de pérdidas de calor a través de los cerramientos del local debido a la desigualdad térmica entre el interior y el exterior. Depende, pues, de las temperaturas interior y exterior, la conductividad térmica de los cerramientos del local y de la magnitud de la superficies de transmisión de calor según la expresión:

$$Q_t = \sum K_g \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

Donde

K_g : Coeficiente global de transmisión de calor para cada cerramiento en W/m^2K], cuyo cálculo se muestra en el capítulo 4.

A : Superficie de transmisión de calor del cerramiento, m^2 . Se obtienen gracias a la función área del programa *AutoCad* después de haber modelado la catedral.

T_i : Temperatura de diseño interior del local, en $^{\circ}C$. Se puede ver su valor en el capítulo 6.

T_e : Temperatura exterior, en $^{\circ}C$. Valor en el capítulo 5. No se considera el efecto de isla térmica debido a que la diferencia de temperatura entre el centro y las afueras es inapreciable, además al estar en el punto más alto de la ciudad, el efecto no se debe considerar. [14]

7.2 Carga térmica de ventilación

La ventilación es la renovación del aire del interior del local con objeto de mantener unas condiciones sanitarias adecuadas dentro de la Catedral. Puede ser espontánea (infiltraciones a través de rendijas de puertas y ventanas) o controlada (ventilación). Esta carga térmica es la pérdida energética derivada de acondicionar térmicamente el aire entrante de acuerdo a la temperatura interior de diseño del local. La expresión de la carga térmica debido a la renovación o a la infiltración de aire es:

$$Q_v = \dot{m}_a \cdot c_p \cdot (T_e - T_i)$$

Donde:

Q_v : carga térmica debida a la infiltración o a la renovación, en W.

c_p : calor específico del aire, en kJ/kg°C.

T_e : Temperatura ambiente en el exterior, en °C.

T_i : Temperatura del aire en el interior, en °C.

\dot{m}_a : flujo másico de aire, en kg/s. Puede ser el flujo de aire debido a la ventilación controlada o el debido a las infiltraciones. Primero, se calcularán ambos y se introducirá en la fórmula el mayor de esos dos valores.

La renovación controlada se calcula de acuerdo al aire interior que se requiera dependiendo del espacio del local. El RITE IT 1.1.4.2.3 define el número de renovaciones por persona de acuerdo a la calidad del aire. Dado que no aparece en los locales definidos nada sobre iglesias o templos, se escoge el ambiente como de un museo se tratase, al fin y al cabo, en su interior, se guardan obras de arte. Las renovaciones de aire por persona para un IDA2 son 12,5 dm³/s. Suponiendo que en la Catedral puedan entrar, a la vez, 600 personas, será necesario una renovación de 27.000m³/h.

Las infiltraciones son las debidas a las entradas y salidas de aire por entre los huecos de las ventanas y puertas, y se pueden reducir, con diversos materiales aislantes, pero no controlar al 100%. El método que se utiliza para hallar el caudal de infiltraciones es el método de la rendija. Dicho método tiene en cuenta el tipo y orientación del edificio y la intensidad del viento dominante.

El método de las infiltraciones por las fisuras consiste en evaluar la cantidad de aire infiltrado a través de las rendijas de puertas y ventanas, determinándose a partir de la siguiente fórmula:

$$VA_f = \left(\sum_i f_i \cdot L_i \right)$$

VA_f : volumen de aire debido a infiltraciones, en m³/h.

f_i : coeficiente de infiltración de puertas y ventanas, también denominado permeabilidad al aire de las carpinterías, en m³/h·m.

L_i : longitud de las rendijas de las puertas, en m.

La catedral de León, al contar con numerosos ventanales a lo largo de todos sus muros son múltiples las infiltraciones a través de estos. Además hay que considerar las puertas de los hastiales norte, sur y oeste. Para el caso de las

vidrieras, al estar formadas por varios huecos en la piedra, se mayor la longitud de la fisura en un 40%.

Los coeficientes de infiltración se corresponden con el tipo de carpintería de las ventanas y puertas, y con la velocidad media del viento en la localidad de León. La velocidad media del viento en León es de 10,1 km/h (Fuente AEMET).

Al ser la carpintería de las vidrieras de plomo (en las vidrieras no restauradas) y de latón (en las vidrieras restauradas), se toma el factor de infiltración igual a $5\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ correspondiente a ventana metálica normal y una velocidad del viento de 16 km/h. El factor de infiltración de las puertas de madera, para 16 km/h de velocidad media del viento es $10\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$.

Aplicando la fórmula se obtiene que el volumen de las infiltraciones en la catedral es de $17.665,05\text{ m}^3/\text{h}$. Por tanto, se puede ver que el volumen debido a las renovaciones de aire es mayor que el de las infiltraciones, por lo que será elegido aquél para el cálculo de las cargas térmicas debidas a renovación.

7.3 Resultados

La Tabla 2 muestra una simplificación de los datos donde únicamente se detallan las pérdidas a través de los muros y vidrieras separados por orientaciones, las pérdidas debidas a la renovación del aire, para finalizar, con las pérdidas totales que la Catedral sufre (incluido un factor de seguridad del 10%).

	PÉRDIDAS DE CARGA (W)	PÉRDIDAS DE CARGA (kcal/h)
CERRAMIENTOS		
Oeste	-106755,797	-91793,463
Sur	-186922,175	-160724,140
Sureste	-25391,033	-21832,359
Este	-74150,223	-63757,716
Noreste	-37382,972	-32143,570
Norte	-186922,175	-160724,140
SOLERA		
Piedra caliza	-129192,014	-111085,137
Baldosín cerámico	-25513,928	-21938,029
TECHUMBRE		
Nave central	-12593,687	-10828,621
Naves bajas	-50468,815	-43395,370
Qtransmisión	-835292,821	-718222,546
Qventilación	-203719,640	-175167,360
Factor de seguridad del 10%	-103901,246	-89338,991
Qtotal	-1142913,706	-982728,896

Tabla 2: Resumen de las Cargas térmicas

El signo menos en la tabla anterior implica pérdidas de calor. Una descripción más detallada de los resultados de las pérdidas a través de los cerramientos y vidrieras se encuentra en el apartado A7.2 del *Anexo 7: Resultados*.

Observando los resultados obtenidos, la caldera a instalar deberá poseer una potencia nominal superior a las pérdidas de carga obtenidas para poder garantizar un sistema de calefacción óptimo. Para la elección, se tendrá que tener en cuenta también las pérdidas de calor producidas a lo largo de toda la instalación. Dichos cálculos junto con la elección de la caldera se desarrollan en el apartado 8.3 del presente proyecto.

8. Cálculo y dimensionado de la instalación

El presente capítulo viene a resumir las instalaciones necesarias para poder hacer frente a las pérdidas de calor que sufre el templo, así como los grupos generadores que son necesarios para suministrar la potencia calorífica que calienten el agua, los vasos de expansión y chimenea para evacuar los gases.

Para poder hacer frente a las pérdidas de calor a través de las paredes, cubiertas y vitrales, se plantean dos instalaciones, que han de trabajar de forma conjunta: de alta y de baja temperatura. La instalación de baja temperatura está formada por el suelo radiante y radiadores en los bancos. La instalación de alta temperatura está formada por elementos emisores que se encuentran dispuestos a nivel del suelo.

El suelo radiante de la instalación de baja temperatura se encuentra en una disposición sectorizada debajo de la toda la planta de la Catedral. Se dimensiona siguiendo el modelo comercial Polytherm clásico. Gracias a la sectorización, el usuario puede encender las zonas cuando se requiera, con el consiguiente ahorro energético y de dinero que en gas natural supone. Cada sector llevará tantos circuitos de suelo radiante como sean necesarios para mantener la temperatura del suelo por debajo de los 29°C reglamentarios, asumiendo la separación entre tubos que determina el método.

Se emplean para la instalación de los radiadores dos tipos del fabricante Zehnder. Uno de ellos es un haz de tubos horizontal con el tamaño adecuado para poder situarlo en las espaldas de los bancos funcionando a baja temperatura; y el otro tipo, el de alta temperatura, se instala de tal forma que las rejillas del emisor se encuentran a la misma altura que la planta de la iglesia.

La instalación de baja temperatura recibe el agua, procedente de un grupo generador de calor que usa como combustible gas natural, a una temperatura de 50°C y la devuelve a 43°C, proporcionando un salto térmico logarítmico de 25,5°C. En el capítulo 9 del presente proyecto, se aborda la posibilidad de apoyar a este grupo generador de calor mediante colectores solares situados en los tejados del Palacio Arzobispal, situado en dirección sur, en frente del templo. Si bien es verdad que la superficie para colocar los receptores de radiación directa está limitada, estos podrían cubrir un 25% de la demanda.

La instalación de alta temperatura implica que el agua de impulsión, a 75°C procede de un sistema generador de calor, cuya fuente de energía es la biomasa. El retorno lo realizará a 65°C. Esta instalación se divide en 2 ramales, ya que si se hiciera en uno, los diámetros de los tubos serían demasiado grandes.

8.1 Cálculo y dimensionado de la instalación de baja temperatura

Como se ha comentado en la introducción del capítulo, la instalación de baja temperatura conlleva, a su vez, la instalación de suelo radiante y los radiadores en los bancos del templo. En la Figura 25 se muestra un esquema muy simple, pero aclaratorio de lo que se va a abordar. La instalación completa se proyecta en los planos 22 al 28 del *Anexo 8: Planos y esquemas*.

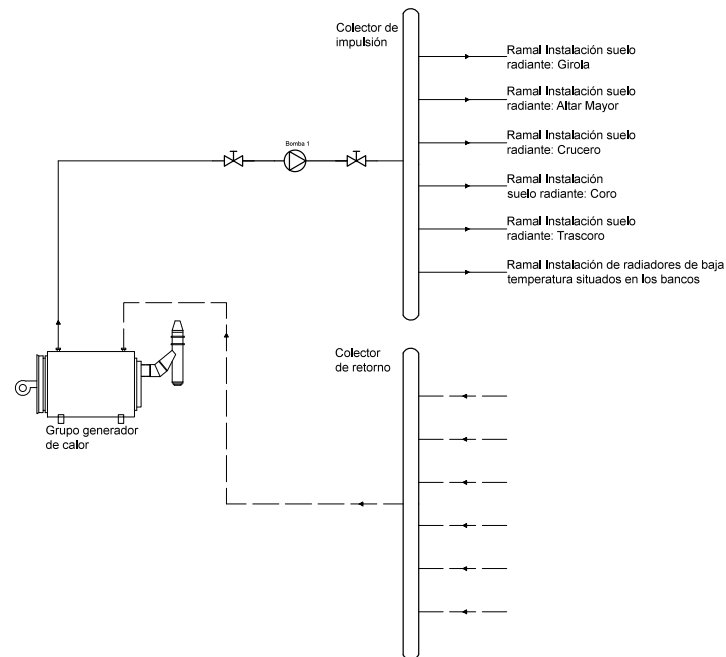


Figura 25: Esquema simplificado de la instalación de baja temperatura

8.2.1 Instalación de suelo radiante

Una vez calculadas las necesidades caloríficas de toda la catedral se procederá a estimar la instalación de suelo radiante clásico necesaria, calculando el número de circuitos a instalar en cada sectorización, la distancia entre tubos, longitud total de tubo, temperaturas máximas de superficie y distribuidor a instalar.

La potencia que se instalará en la instalación de suelo radiante será la máxima que nos permita la instalación ya que esta ha de cumplir la normativa correspondiente (UNE-EN 1264) que limita la temperatura del suelo y la distancia entre los tubos.

Según UNE-EN 1264, una calefacción por suelo radiante, bien proyectada y ejecutada, se considera como el sistema ideal de distribución de calor. El calor es uniforme y extremadamente agradable, siempre que se mantenga una temperatura de superficie dentro de los límites.

En cualquier calefacción por suelo es imprescindible mantener la temperatura de superficie del suelo por debajo de unos límites para que no empiece a perder ese bienestar que proporciona este tipo de calefacción.

La temperatura máxima admisible de superficie del suelo que fija la norma UNE-EN 1264 es de 29°C para un edificio como la Catedral.

Cumpliendo con la normativa, la potencia que cubrirá el suelo radiante, como máximo será de 677 kW.

Se plantea una sectorización de la instalación para mayor facilidad en el montaje y, posteriormente para su utilización. Los sectores en los que se divide esta instalación serán los siguientes y, de esta forma se denominarán cuando se quiere hacer referencia a ellos.

- Girola: incluye las 5 capillas de la girola, la capilla del santo Cristo y el corredor que une estas dependencias.

- Altar mayor: dividido, a su vez en tres regiones, altar mayor 1 (AM1), altar mayor (AM) y altar mayor 2 (AM2). Tanto AM1 como AM2 tienen la misma superficie de suelo.
- Crucero: dividido, también, en tres regiones. Crucero 1 (CR1), Crucero (CR) y Crucero 2 (CR2). CR1 y CR2 tendrán la misma superficie.
- Coro (CO).
- Trascoro: Este también se encuentra dividido en tres zonas, Trascoro 1 (TR1), Trascoro (TR) y Trascoro 2 (TR2). TR1 y TR2, misma superficie.

Estas zonas se pueden observar en la Figura 26 que recoge todas estas regiones en la planta de la catedral.

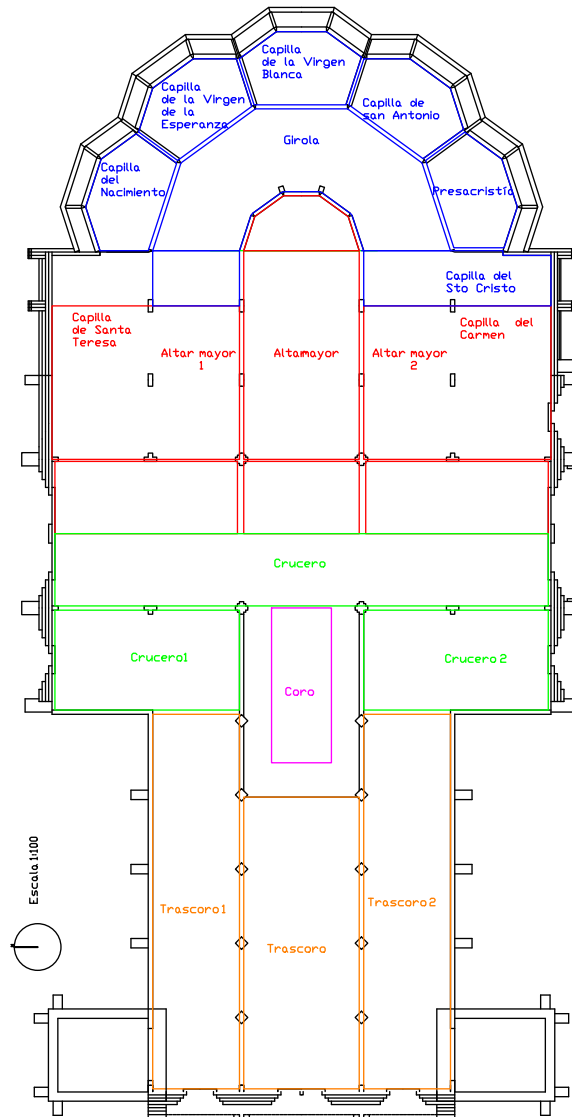


Figura 26: Denominación de las regiones de suelo radiante

Para ello se deberán tener en cuenta los siguientes premisas básicas establecidas por el manual técnico para instalación de suelo radiante clásico de Polytherm, así como aclaraciones para una mayor compresión.

Se parte de la superficie de cada zona, de la potencia que debe emitir cada una, el tipo de pavimento del suelo y la distancia al colector.

Con los datos proporcionados, la potencia que debe emitir cada sector será el cociente entre la potencia total y la superficie de cada región que recibe el nombre de calor específico.

Con estos datos se acude a la Tabla 4 que nos da como resultado la temperatura media del suelo (No debe ser superior a 29°C), la distancia entre los tubos en centímetros, que se denomina RA, y los metros cuadrados de superficie admisibles en cada circuito. Los datos de entrada a esta tabla serán la temperatura de agua caliente, de 50°C para todos los casos, la temperatura ambiente de 20°C, y el tipo de suelo, piedra/cerámica.

Posteriormente se pasa a calcular el número de circuitos que tiene cada región aplicando la fórmula siguiente:

$$n^{\circ}circuitos_i = \frac{Superficie_i}{superficie_i/circuito}$$

El subíndice i representa cada una de las secciones y regiones en las que se divide la planta de la Catedral.

Después se calculan los metros lineales que cada circuito debe disponer. Para ello se emplea la Tabla 3 que, en función de RA, se obtiene los metros lineales por superficie siguiendo la expresión:

$$Longitud\ lineal_i = 2 \cdot S_i \cdot L_i$$

donde:

2: considera circuito de ida y de retorno.

S_i : Superficie de la región i en m².

L_i : necesidades de tubo de cada región i (Tabla 3): metros lineales por m².

Distancia entre tubos RA (cm)	RA8	RA16	RA25	RA33
Necesidades lineales de tubo (metros lineales/m ²)	11	6	4,25	3
Superficie máxima por circuito	11	20	28	40

Tabla 3: Necesidades de Tubo

Para calcular la longitud total de tubo necesaria habrá que considerar los metros lineales existentes entre la caldera y los colectores. Como no se dispone de este dato, porque habría que medir en el espacio donde se instalaría se supone una distancia, por exceso, de 4 metros.

Color Especifico q (W/m²)		35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170			
Temperatura media en superficie de suelo		23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35																		
Temperatura de entrada 40°C en colectores Temperatura ambiente 20 °C	$R_{0,01} = 0,01 \text{ mK/W}$ Cerámico / Píedras dilatados	33	33	33	33	25	25	16	16	16	16	8	8	8	8	8	8	8													RA Recom. m² max.	
	$R_{0,05} = 0,05 \text{ mK/W}$ / Madera fina y linóleo	40,0	35,0	30,0	25,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	17,0	13,0	11,0	10,0	10,0	9,0	8,0	7,0	5,5												RA Recom. m² max.	
	$R_{0,10} = 0,10 \text{ mK/W}$ / Madera espesor medio y moquetas finas	33	33	25	25	25	16	16	16	8	8	8	8																		RA Recom. m² max.	
	$R_{0,15} = 0,15 \text{ mK/W}$ / Maderas gruesas y moquetas	40,0	38,0	30,0	24,0	21,0	19,0	18,0	14,5	13,0	11,0	9,0	7,0																		RA Recom. m² max.	
Temperatura de entrada 45°C en colectores Temperatura ambiente 20 °C	$R_{0,01} = 0,01 \text{ mK/W}$ Cerámico / Píedras dilatados		33	33	33	25	25	25	25	25	16	16	16	16	16	16	16	16	16	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	RA Recom. m² max.	
	$R_{0,05} = 0,05 \text{ mK/W}$ / Madera fina y linóleo	33	33	33	25	25	25	25	25	16	16	16	16	16	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	RA Recom. m² max.	
	$R_{0,10} = 0,10 \text{ mK/W}$ / Madera espesor medio y moquetas finas	40,0	35,0	30,0	25,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0	20,0	17,0	13,0	11,0	9,0	8,0	8,0	7,0	6,0	5,5											RA Recom. m² max.	
	$R_{0,15} = 0,15 \text{ mK/W}$ / Maderas gruesas y moquetas	33	33	33	25	25	25	16	16	16	16	8	8	8																	RA Recom. m² max.	
Temperatura de entrada 50°C en colectores Temperatura ambiente 20 °C	$R_{0,01} = 0,01 \text{ mK/W}$ Cerámico / Píedras dilatados			33	33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	8	8	8	8	8	RA Recom. m² max.
	$R_{0,05} = 0,05 \text{ mK/W}$ / Madera fina y linóleo			33	33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	8	8	8	8	RA Recom. m² max.
	$R_{0,10} = 0,10 \text{ mK/W}$ / Madera espesor medio y moquetas finas			33	33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	8	8	8	8	RA Recom. m² max.
	$R_{0,15} = 0,15 \text{ mK/W}$ / Maderas gruesas y moquetas			33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	8	8	8	8	RA Recom. m² max.
Temperatura de entrada 55°C en colectores Temperatura ambiente 20 °C	$R_{0,01} = 0,01 \text{ mK/W}$ Cerámico / Píedras dilatados					33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16	RA Recom. m² max.
	$R_{0,05} = 0,05 \text{ mK/W}$ / Madera fina y linóleo					33	33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16	RA Recom. m² max.
	$R_{0,10} = 0,10 \text{ mK/W}$ / Madera espesor medio y moquetas finas					33	33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16	RA Recom. m² max.
	$R_{0,15} = 0,15 \text{ mK/W}$ / Maderas gruesas y moquetas					33	33	33	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	16	16	16	16

Tabla 4: Método Polytherm, sistema clásico

La Tabla 5 muestra un resumen de los resultados para cada región. Únicamente se incluyen la superficie, el calor específico, el RA y los metros lineales de cada circuito.

Hueco	Girola	Altar Mayor	Crucero	Coro	Trascoro
Superficie (m²)	1392,811	AM1 746,933	CR1 328,197		TR1 578,826
		AM 664,880	CR 634,127	165,184	TR 599,787
		AM2 746,933	CR2 328,197		TR2 578,826
Potencia térmica (W)	135000	AM1 72000	CR1 32000		TR1 60000
		AM 69000	CR 66000	17000	TR 62000
		AM2 72000	CR2 32000		TR2 60000
q=Q/S (W/m²)	96,926	AM1 96,394	CR1 97,503		TR1 103,658
		AM 103,778	CR 104,080	102,916	TR 103,370
		AM2 96,394	CR2 97,503		TR2 103,658
RA (cm)	25	AM1 25	CR1 25		TR1 16
		AM 16	CR 16	16	TR 16
		AM2 25	CR2 25		TR2 16
nº circuitos	70	AM1 38	CR1 17		TR1 29
		AM 34	CR 32	9	TR 30
		AM2 38	CR2 17		TR2 29
metros lineales/circuito	169,127	AM1 167,08	CR1 164,10		TR1 239,51
		AM 234,66	CR 237,80	220,25	TR 239,92
		AM2 167,08	CR2 164,10		TR2 239,51

Tabla 5: Resumen de resultados de Suelo Radiante

A continuación se debe calcular los grupos de bombas que serán las encargadas de mover el agua de la instalación. Las bombas estarán colocadas en el

cuarto de la caldera. Para ello es necesario obtener las pérdidas de carga del circuito de cada región más alejado y el caudal total que debe mover cada bomba.

El caudal de cada región se calcula según la siguiente expresión analítica:

$$q_i = \frac{Q_i}{c_p \cdot (T_e - T_r)} \cdot \rho$$

Donde:

q_i : caudal de cada región, en l/h.

Q_i : potencia calorífica de cada región y por circuito.

C_p : calor específico del agua (1 kcal/kg°C)

T_e : temperatura de entrada en °C.

T_r : temperatura de retorno en °C.

ρ : densidad del agua (1 kg/l)

El caudal que debe mover cada bomba será la suma de cada uno de los caudales cada zona.

Para dimensionar las pérdidas de carga es necesario determinar primero el diámetro de cada tubo del circuito de suelo radiante que se obtiene a partir de:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_i}{\pi \cdot v}}$$

Donde cada término significa:

d : diámetro de la tubería en m.

q_i : caudal de cada región, en m³/s.

v : velocidad del fluido en el interior en m/s. Se toman 0,3 m/s.

La gráfica de la Figura 27 (Tubos del fabricante Wirsbo) va asociada a la Tabla 4 y muestra las pérdidas de carga por metro lineal del circuito. El parámetro de entrada es el caudal de cada región en litros por segundo.

Por último se debe multiplicar las pérdidas de carga obtenidas por el factor de corrección 1,05 que tiene en cuenta que la temperatura que circula por los tubos es de 50°C y por los metros lineales del circuito más alejado a la bomba que debe suministrar. Estos metros lineales incluyen la longitud de ida y de retorno del circuito y la distancia de ese circuito al colector.

La Tabla 6 muestra las pérdidas de carga que se obtienen para cada circuito de diámetro 16 mm y para el caudal que circula por el mismo.

	GI1	GI2	AM1	AM	AM2	CR1
Caída de presión (mm.c.a/m)	18,9	18,9	17,85	19,95	17,85	18,375
	CR	CR2	CO	TR1	TR	TR2
Caída de presión (mm.c.a/m)	21	18,375	17,85	21	21	21

Tabla 6: Pérdidas de carga de cada circuito de cada región

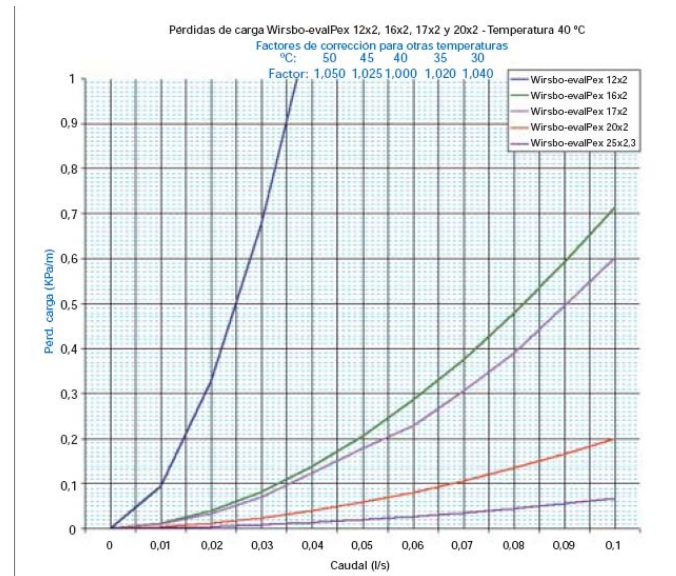


Figura 27: Diagrama de pérdidas de carga en tubos Wirsbo-evalPEX I

Los esquemas, que a continuación se presentan son un resumen de la instalación que se debe hacer en cada división de la planta para abordar la completitud de los circuitos que se deben instalar. La instalación completa se encuentra en los planos correspondientes.

Las pérdidas de carga de cada uno de los tubos de la acometida principal de cada región y los tubos de unión entre esta acometida y cada uno de los colectores se obtienen de la gráfica representada en la Figura 28.

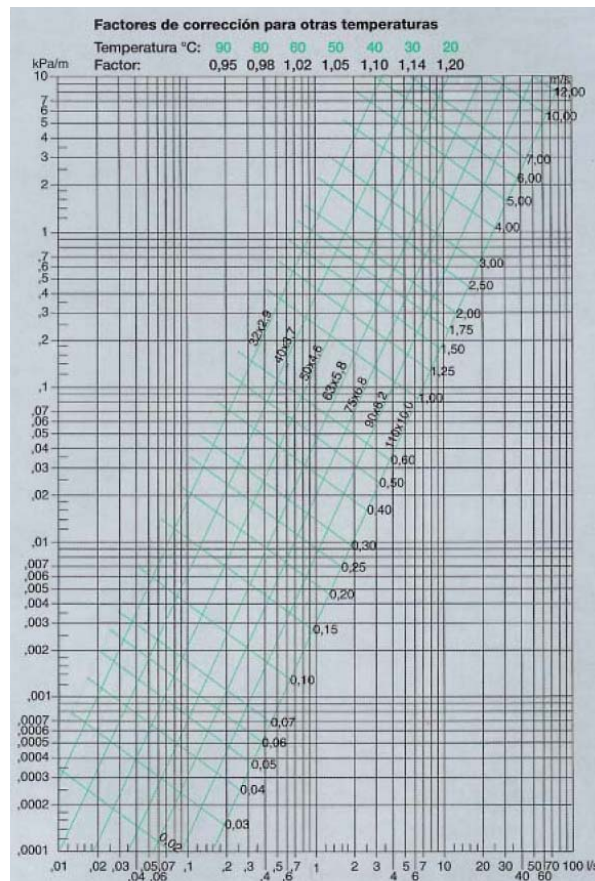


Figura 28: Diagrama de pérdidas de carga en tubos Wirsbo-evalPEX II

Girola

La instalación de 70 circuitos en el tramo de la girola hace imprescindible que se divida la instalación en dos bombas, que se denominan GI1 y GI2. La bomba GI1 alimentará a 3 colectores de 12 entradas y 12 salidas y la bomba GI2 proporciona caudal a dos colectores de 12 entradas y 12 salidas y 1 colector de 10 entradas y 10 salidas. Por cada circuito del suelo radiante circulará 165,83 l/h de agua. La Figura 29 muestra un esquema simplificado de la instalación; que se corresponde con el plano 23 del *Anexo 8: Planos y esquemas*. Los diámetros que se pueden observar en esta figura corresponden con las siguientes pérdidas de carga (se aplica el coeficiente de mayoración 1,05 por circular el agua a 50°C). Por cada instalación circula un caudal diferente, por tanto, las pérdidas de carga también lo serán pues dependen directamente de él.

Bomba GI1:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 4,41 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,52 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,31 \text{ mm.c.a./m}$$

Bomba GI2:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 3,675 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,52 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,575 \text{ mm.c.a./m}$$

Para dimensionar las bombas se hace necesario calcular las pérdidas de carga de los circuitos más alejados. Estos corresponden con el circuito 12 del colector D3 y con el circuito 10 del colector D6. La distancia entre ambos colectores y el circuito más alejado es de 84,32 metros, que se suma a la longitud del circuito ya que ambos tubos tienen el mismo diámetro (Tabla 5).

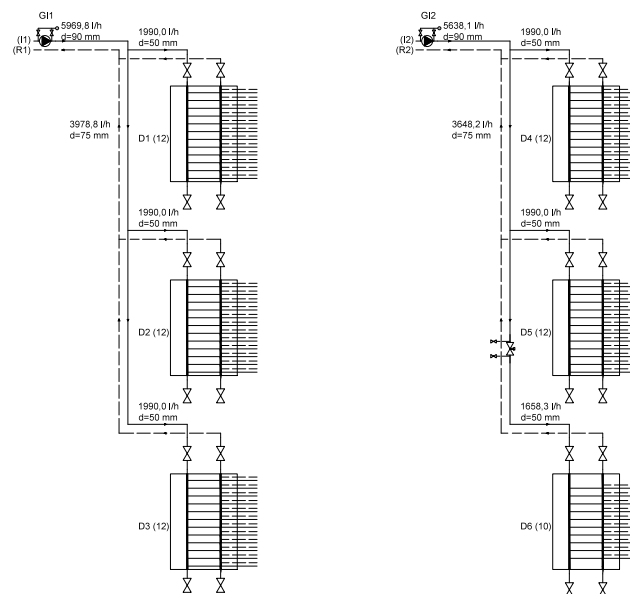


Figura 29: Instalación de colectores de la Girola

Sumando las pérdidas de carga de los tramos más desfavorables, teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en cada circuito (Tabla 6) se obtiene los resultados finales de caída de presión para cada tramo, que se muestran en la Tabla 7. La obtención de este valor se amplía en el *Anexo 7: Resultados*.

Altar Mayor

La región del altar mayor del suelo radiante de la Catedral se encuentra dividida, como se ha visto, en tres regiones denominadas AM1, AM y AM2. Cada región lleva su propia bomba de impulsión.

Para cubrir los 38 circuitos de la región AM1 son necesarios tres colectores de 10 entradas y 10 salidas y uno de 8 entradas y 8 salidas. Por cada circuito de esta región circulan 162,92 l/h de agua. La distancia entre el colector y el circuito más desfavorable (circuito 8 del colector A4) es 159,28 metros.

Los 34 circuitos que conforman la región AM se dividen en dos colectores de 12 entradas y 12 salidas y un colector de 10 entradas y 10 salidas. El caudal circulante por cada circuito de esta región es 174,50 l/h. La distancia entre el colector y el circuito más alejado (circuito 10 del colector B3) es 160,249 metros

La región AM2 es similar a la región AM1. La única diferencia, como se verá más adelante es las pérdidas de carga, que son mayores en esta región por estar sus circuitos más alejados de los colectores. La distancia mas desfavorable (circuito 8 del colector C4) es 215,289 metros.

La Figura 30 muestra un resumen simplificado de la instalación completa que corresponde con el plano 24 del *Anexo 8: Planos y esquemas*.

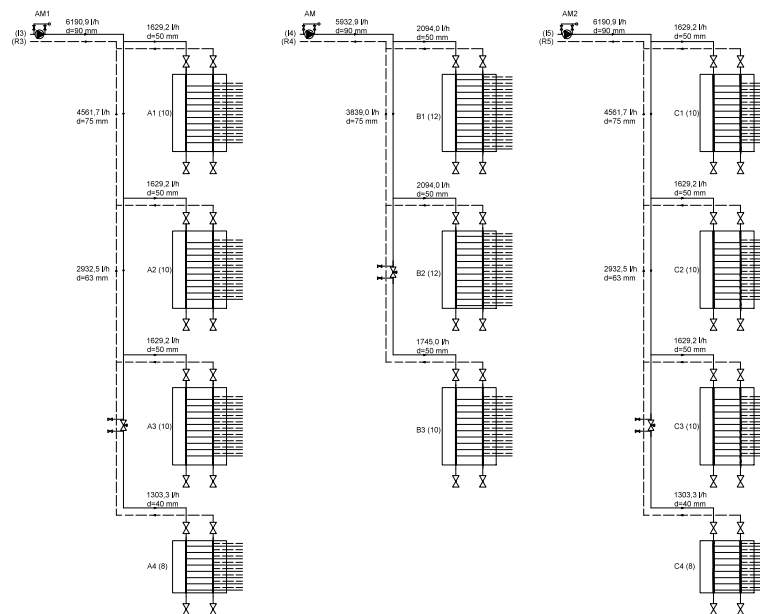


Figura 30: Instalación de colectores del Altar Mayor

Las pérdidas de presión por metro de tubería para la acometida principal y para las conexiones a cada colector se obtienen de la gráfica representada en la Figura 28: Las pérdidas de presión dependen del caudal que circula por cada tubo.

Bomba AM1:

$$d = 40 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 6,825 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 63 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 3,15 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,73 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,30 \text{ mm.c.a./m}$$

Bomba AM:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 3,675 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,10 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,838 \text{ mm.c.a./m}$$

Bomba AM2:

$$d = 40 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 6,825 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 63 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 3,15 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,73 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,30 \text{ mm.c.a./m}$$

Sumando las pérdidas de carga de los tramos más desfavorables, teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en cada circuito (Tabla 6) se obtiene los resultados finales de caída de presión para cada tramo, que se muestran en la Tabla 7. La obtención de este valor se amplía en el *Anexo 7: Resultados*.

Crucero

Al igual que ocurre con la región del Altar Mayor, el sector del crucero también se encuentra dividido en tres partes: CR1, CR y CR2. También, cada región dispone de su propia bomba de impulsión y la región CR1 y CR2 son iguales a excepción de las pérdidas de carga que son mayores en CR2 como se verá más adelante.

El sector CR1 cuenta con un total de 17 circuitos divididos en dos colectores, uno de 9 entradas y 9 salidas y otro de 8 entradas y 8 salidas. Cada circuito del sistema recibe 161,85 l/h de agua. La distancia al circuito más desfavorable (circuito 8 del colector A2) es 213,403 metros.

La zona CR se compone de 32 circuitos. Para poder hacer frente a todos ellos hace falta cuatro colectores de 8 entradas y 8 salidas. Por cada circuito de esta zona transcurre un caudal de 177,34 l/h de agua. La distancia desde el colector al circuito más alejado (circuito 8 del colector B4) es 236,889 metros.

El sector CR2 es similar al CR1, con la salvedad que la distancia desde el colector C2 al circuito más desfavorable es 269,412 metros.

La Figura 31 muestra un esquema simplificado de la instalación de colectores del crucero. La instalación completa se encuentra en el plano 25 del *Anexo 8: Planos y esquemas*.

Las pérdidas de carga por unidad de longitud del tubo obtenidas de la gráfica de la Figura 28 en función del caudal que circula por ellas son:

Bomba CR1:

$$d = 40 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 6,825 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 63 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,73 \text{ mm.c.a./m}$$

Bomba CR:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,73 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 63 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,93 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,52 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,89 \text{ mm.c.a./m}$$

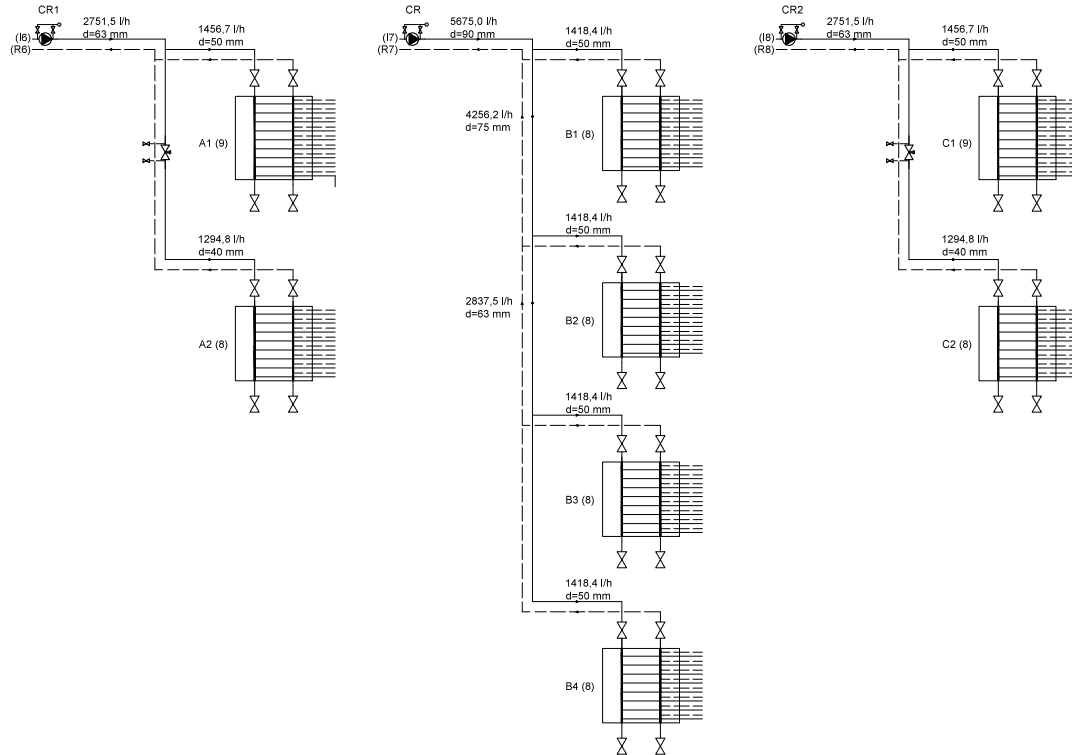


Figura 31: Instalación de colectores del Crucero

Bomba CR2:

$$d = 40 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 6,825 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 63 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,73 \text{ mm.c.a./m}$$

Sumando las pérdidas de carga de los tramos más desfavorables, teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en cada circuito (Tabla 6) se obtiene los resultados finales de caída de presión para cada tramo, que se muestran en la Tabla 7. La obtención de este valor se amplía en el *Anexo 7: Resultados*.

Coro

Esta región, la más pequeña de las cinco, sólo es necesario un colector de 9 entradas y 9 salidas para poder cubrir la totalidad de los circuitos que hacen falta. Por cada circuito de esta zona transcurre un caudal de 162,415 l/h de agua. El circuito 9 de este colector es que el se encuentra a una distancia de 223,340 metros.

La Figura 32 muestra un esquema resumido de la instalación de colectores del coro que se encuentra completa en el plano 26 del *Anexo 8: Planos y Esquemas*.

Las pérdidas asociadas a cada circuito de esta región y para diámetro 16 mm aparecen en la Tabla 6.

Las pérdidas de carga por unidad de longitud del tubo obtenidas de la gráfica de la Figura 28 en función del caudal que circula por ellas son:

Bomba CO:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 2,73 \text{ mm.c.a./m}$$

El resultado de las pérdidas de carga de este circuito se obtendrá sumando las pérdidas individuales de cada uno de los tramos (Tabla 6) y aparece en la Tabla 7. El cálculo completo se detalla en el *Anexo 7: Resultados*.

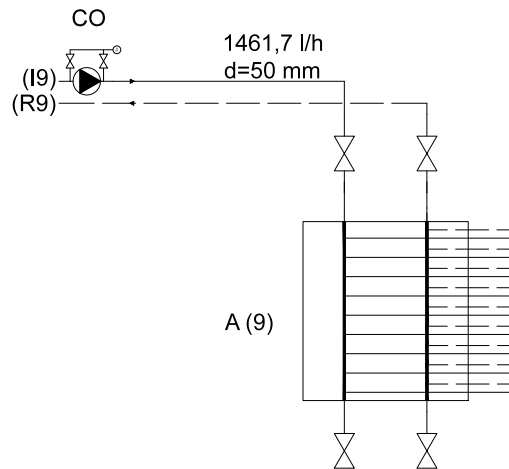


Figura 32: Instalación de colectores del Coro

Trascoro

Como en los sectores del Altar Mayor y del crucero, debido a la multitud de circuitos que componen esta zona, se hace necesario dividirla en tres: TR1, TR y TR2. Cada zona contará con una bomba de impulsión y las zonas TR1 y TR2 sólo se diferencian en las pérdidas de carga.

El sector TR1 debe cubrir 29 circuitos para lo cual son necesarios dos colectores de 10 entradas y 10 salidas y otro colector de 9 entradas y 9 salidas. El caudal circulante por cada circuito son 177,90 l/h de agua. El circuito más desfavorable (circuito 9 del colector A3) se encuentra a 301,639 metros.

El sector TR debe hacer frente a un circuito más que la región TR1 por lo que son necesarios tres colectores de 10 entradas y 10 salidas; además, por cada circuito circularán 170,70 l/h. El circuito más alejado es el décimo del colector B3 y está a una distancia de 331,728.

El sector TR2 se diferencia con el TR1 en que la distancia del circuito más alejado (el noveno del colector C3) es 357,649.

La Figura 33 muestra un esquema simplificado de la instalación de los colectores de la región del trascoro. En el plano 27 del *Anexo 8: Planos y Esquemas* se encuentra la instalación de esta zona de la Catedral.

Las pérdidas de carga por unidad de longitud del tubo obtenidas de la gráfica de la Figura 28 en función del caudal que circula por ellas son:

Bomba TR1:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 3,36 \text{ mm. c. a/m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,838 \text{ mm. c. a/m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,68 \text{ mm. c. a/m}$$

Bomba TR:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 3,78 \text{ mm. c. a/m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,838 \text{ mm. c. a/m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,575 \text{ mm. c. a/m}$$

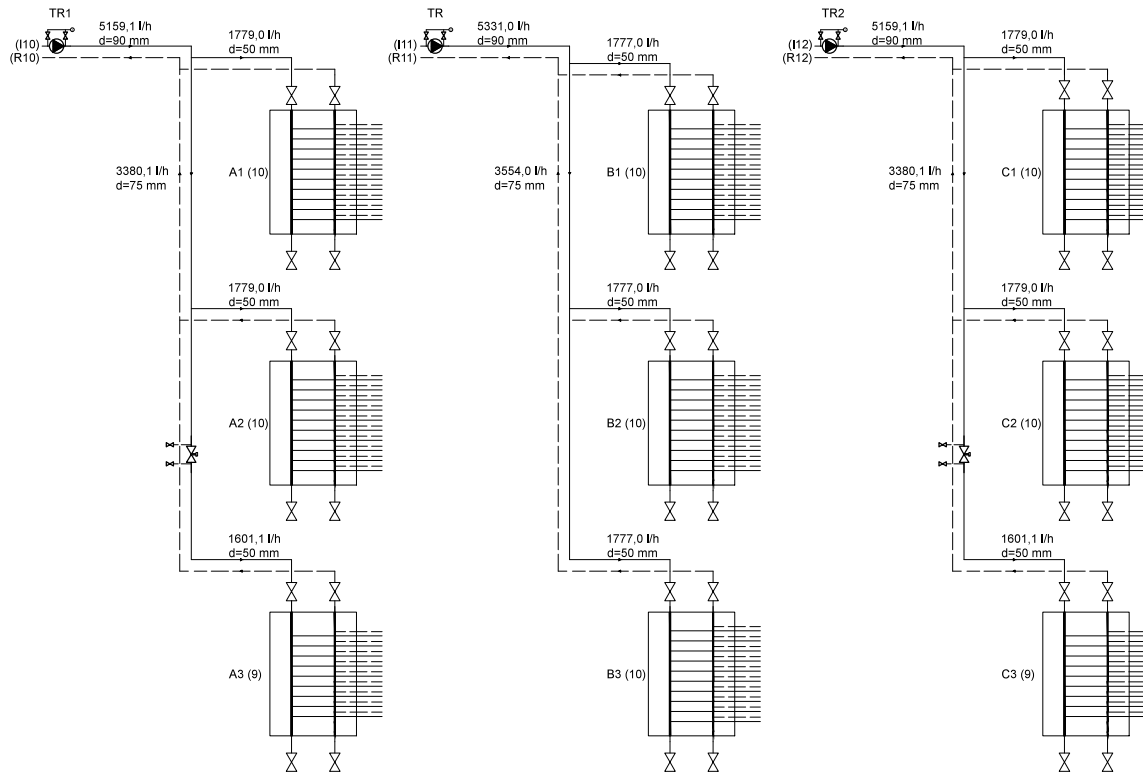


Figura 33: Instalación de colectores del Trascoro

Bomba TR2:

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 3,36 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 75 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,838 \text{ mm.c.a./m}$$

$$d = 90 \text{ mm} \rightarrow \Delta P = 1,68 \text{ mm.c.a./m}$$

El resultado de las pérdidas de carga de este circuito se obtendrá sumando las pérdidas individuales de cada uno de los tramos (Tabla 6) y aparece en la Tabla 7. El cálculo completo se detalla en el *Anexo 7: Resultados*.

El siguiente paso es la elección de las bombas conforme a la pérdida de carga y al caudal que deben mover. Todas las bombas son del fabricante Sedical. Se eligen conforme a dos supuestos, más económica y más silenciosa. Hay casos que coinciden. La Tabla 7 da cuenta de las bombas [22].

Nomenclatura	Caudal (l/h)	Caída de presión (m.c.a)	Bomba seleccionada	
			Económica	Silenciosa
GI1	5969,772	5,762	SAP 25/125 - 0.25/K	SAM 30/145 - 0.20/K
GI2	5638,130	5,768	SAP 25/125 - 0.25/K	SAM 30/145 - 0.20/K
AM1	6190,885	7,016	SAP 30/20 T	SIP 32/105.1 - 0.25/K
AM	5932,930	9,474	SAP 30/20 T	SAP 25/125 - 0.65/K
AM2	6190,885	8,216	SAP 30/20 T	SIP 32/105.1 - 0.25/K
	2751,505	8,352	SAP 25/125 - 0.25/K	SAP 25/125 - 0.25/K
CR	5674,978	11,982	SAP 30/20 T	SAP 25/125 - 0.65/K
CR2	2751,505	9,587	SAP 25/125 - 0.25/K	SAP 25/125 - 0.25/K
CO	1461,737	9,529	SAP 25/125 - 0.25/K	SAP 25/125 - 0.25/K
TR1	5159,070	13,655	SAP 30/20 T	SAP 25/125 - 0.65/K
TR	5331,040	14,422	SAP 30/20 T	SIM 50/265.1 - 1.1/K
TR2	5159,070	15,066	SAP 30/20 T	SIM 50/265.1 - 1.1/K

Tabla 7: Bombas de la instalación de suelo radiante

Las hojas de características de las bombas se encuentran en el *Anexo 10: Fabricantes*.

La distribución de los circuitos de suelo radiante será de doble serpentín en la zona de la girola y espiral en el resto de las zonas, que son más cuadradas y es más fácil afrontar esta distribución.

8.2.2 Instalación de radiadores en los bancos

Como el título indica, estos radiadores del fabricante Zehnder se instalarán en los bancos del altar mayor, del crucero y de las capillas de la virgen del Carmen y de Santa Teresa.

La elección de estos radiadores viene condicionada, no sólo por el salto térmico, sino también por la altura de los elementos emisores, ya que no pueden sobrepasar los 30 cm, espacio máximo que permite el banco. El salto térmico de estos radiadores de baja temperatura se hace conforme a estas fórmulas:

Primero, se debe comprobar si el salto térmico se hace conforme a la media aritmética o logarítmica, para ello se debe calcular el siguiente cociente.

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} = \frac{T_s - T_a}{T_e - T_a}$$

donde:

Ts: temperatura de salida del radiador, en °C.

Te: temperatura de entrada al radiador, en °C.

Ta: temperatura de diseño del local, en °C.

Si el cociente es mayor o igual a 0,7, entonces se aplicará la media aritmética y si es menor la media logarítmica.

Para el caso particular, que nos concierne, la temperatura de entrada al radiador de baja temperatura será de 50°C y la de salida es de 43°C. Siendo la temperatura de diseño de 21°C, el cociente es menor que 0,7, por lo que el salto térmico vendrá dado por la expresión:

$$\Delta T = \frac{T_e - T_s}{\ln \left(\frac{T_e - T_a}{T_s - T_a} \right)}$$

El salto térmico obtenido con la relación de temperaturas que se han elegido es 25,5°C. [21]

De entre todos los radiadores y emisores de calor investigados el que se adapta a las condiciones de espacio y estética es el KLEO HD, del fabricante Zehnder (ambos radiadores se especifican en la hoja de características del *Anexo 10: Fabricantes*). Se tienen en consideración dos tamaños de este tipo de emisor, el de 2100 mm y el de 2200 mm, situados respectivamente, en los bancos de 4,32 metros y 7 metros. Las dos figuras siguientes vienen a situar el lugar donde se instalarán estos elementos. Los planos del diseño de los bancos vienen expuestos en el plano 14 y 15 del *Anexo 8: Planos y esquemas*.

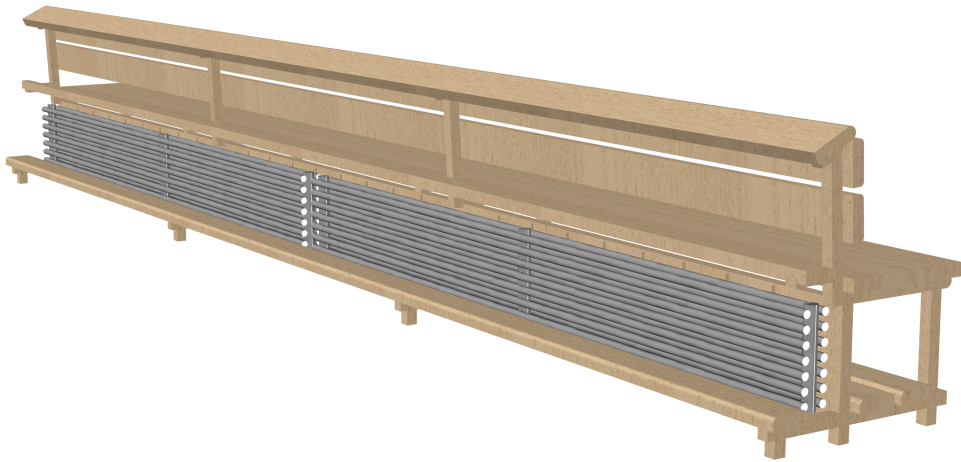


Figura 34: Radiador KLEO KLHD 2100mm en banco de 4,34 m

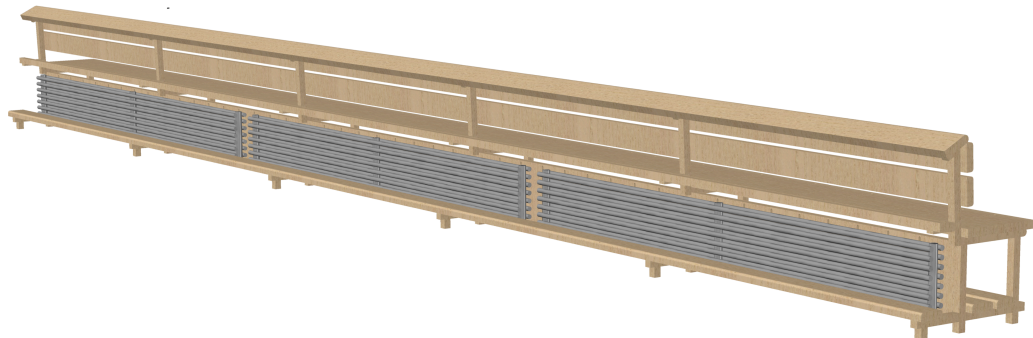


Figura 35: Radiador KLEO KLHD 2200 mm en banco de 7 m

Se distinguen en la instalación 2 tipos de bancadas:

- Bancada de 3 radiadores KLHD 2200mm. Se instalan en los bancos de 7 metros que están situados en el altar mayor y el crucero. En total habrá 100 bancos.
- Bancada de 2 radiadores KLHD 2100mm, en los bancos de 4,34 metros. Habrá 17 bancos de este tipo en la capilla de Santa Teresa y otros 17 bancos en la capilla de la Virgen del Carmen. Además habrá 40 bancos situados en el crucero al lado de los bancos de 7 metros del crucero.

Al ser una instalación de baja temperatura, se debe calcular la potencia que realmente emitirán debido al salto térmico que se produce en ellos. Para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$P_{30} = P_{50} \cdot \left(\frac{\Delta T}{50}\right)^n$$

Donde:

$P_{25,5}$: es la potencia del radiador para un salto térmico de 25,5°C.

P_{50} : es la potencia del para un salto térmico de 50°C,

ΔT : Salto térmico de 25,5°C, en este caso.

n : exponente característico del fabricante.

A continuación, la Tabla 8 muestra, para cada radiador la potencia que realmente emite cada uno, la potencia por banco y la potencia total.

Modelo	n	P ₅₀ (W)	P _{25,5} (W)	Potencia/banco (W/banco)	nº bancos	Potencia total (W)
KLHD-022 (L=2,1 m)	1,26	1134	485,458	970,916	74	71847,753
KLHD-022 (L=2,2 m)		1188	508,575	1525,724	100	152572,449
					Potencia total	224420,202

Tabla 8: Potencia de los radiadores

En la Figura 36 se muestra el esquema de distribución de los bancos a lo largo de la planta de la Catedral.

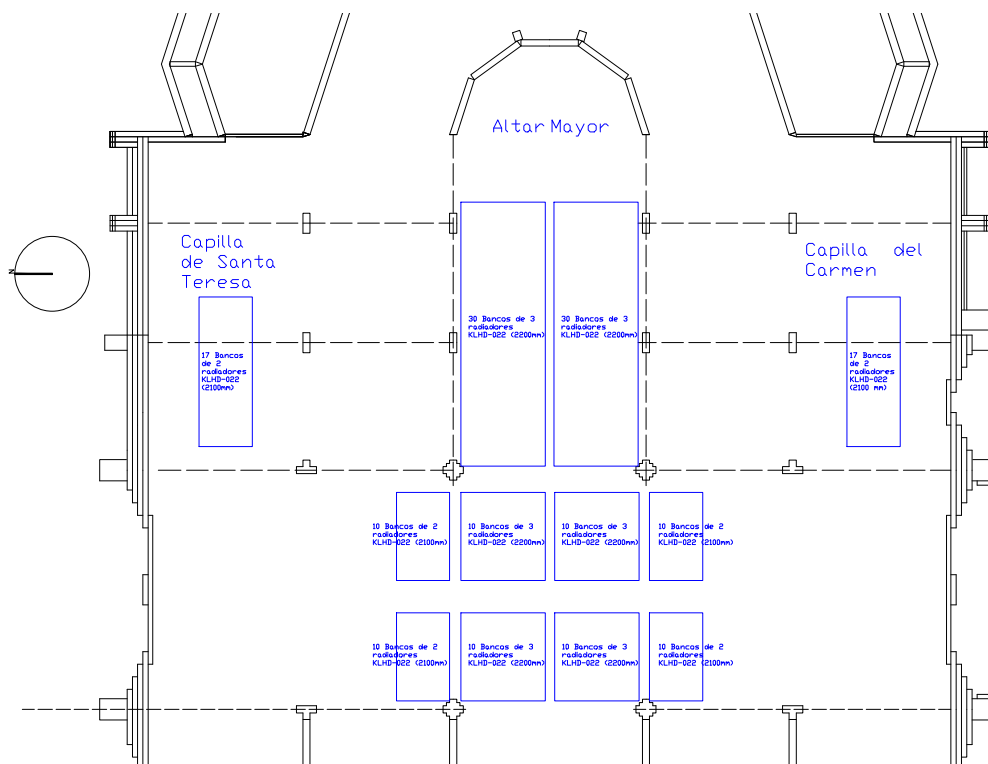


Figura 36: Disposición de los bancos en la planta

Los dos o tres radiadores dispuestos en los bancos de 4,34 metros o 7 metros, respectivamente, se dispondrán según la configuración bitubo debido a su principal ventaja de que hay una distribución uniforme del calor a lo largo del radiador.

Para hacer una instalación más eficiente, se plantean cuatro bloques que tendrán la mismas características, es decir, tamaño de radiador y banco, mismas

pérdidas de carga, caudal circulante; para, posteriormente, poder realizar un equilibrado del sistema hidráulico con las válvulas correspondientes. Los bloques en los que se encuentra dividida esta instalación son:

BLOQUE 1: Radiadores del Altar Mayor. Son de 7 metros, por lo que se utilizan 3 radiadores de 2,2 metros en cada banco. En total lo forman 60 bancos, divididos en 30 bancos en cada lado.

BLOQUE 2: Radiadores de la Capilla de Santa Teresa. Lo forman una fila de 17 bancos de 4,34 metros, por lo que cada banco lleva acoplado 2 radiadores de 2,1 metros.

BLOQUE 3: Bancos de la Capilla de la Virgen del Carmen. Misma instalación que el bloque 2, diferenciada, únicamente por las pérdidas de carga, ya que la distancia entre el bloque 3 y la acometida principal es más larga que el bloque 2.

BLOQUE 4: Bancos del Crucero. Están formados por 40 filas de bancos, donde cada fila se construye, a su vez, con un banco de 7 metros (3 radiadores de 2,2 metros) y uno de 4,34 metros (2 radiadores de 2,1 metros). Este bloque es el que presenta la pérdida de carga más elevada de los cuatro y es la que se utiliza para dimensionar la bomba de los radiadores de baja temperatura.

Cada bancada de cada bloque está conectada en paralelo con la acometida principal correspondiente y ésta, a su vez con la acometida general.

La distribución de las bancadas y de los tubos se muestran en la Figura 37. El esquema completo se encuentra en los planos 17 y 28 del *Anexo 8: Planos y esquemas*.

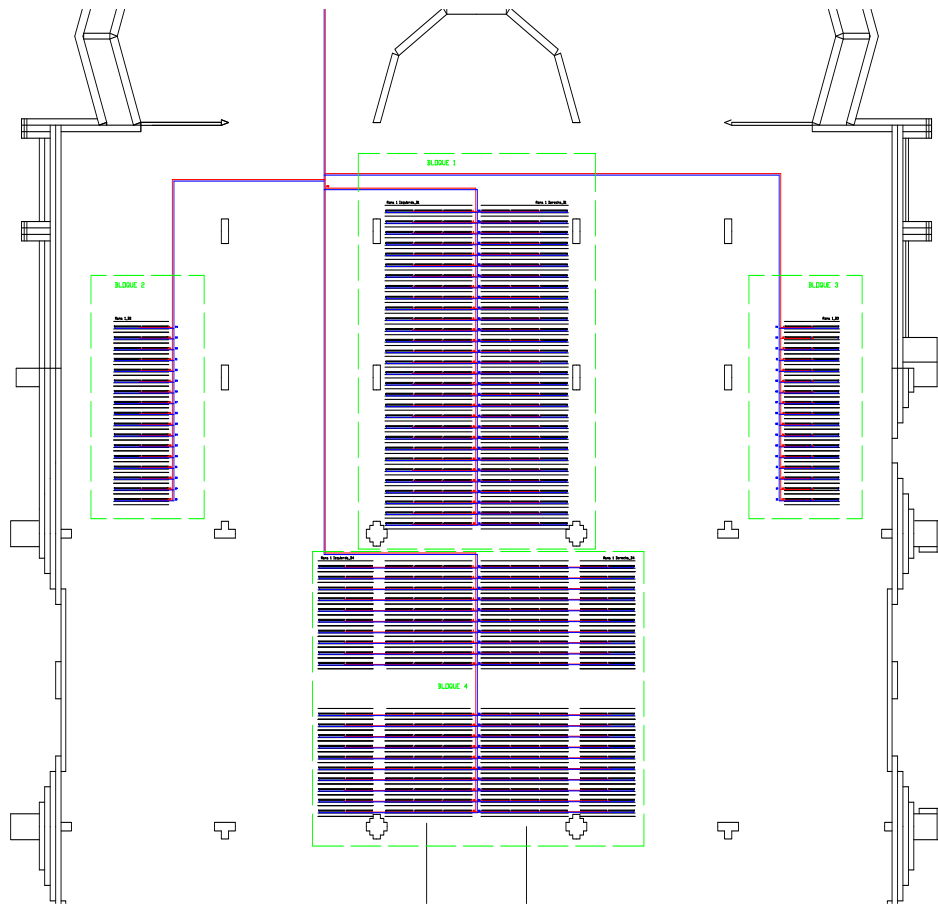


Figura 37: Distribución de los bloques de bancos

Una vez decidida cual va ser la distribución de los bancos y cuanta potencia emite cada uno de ellos, el siguiente paso será calcular los caudales que circulan por los tramos de la instalación, hallar el diámetro y las pérdidas de carga de cada uno de los tubos, comprobando que no sobrepasan el límite de 15 mm.c.a/m.

Para calcular las diferentes pérdidas de carga de los conductos que unen los radiadores en una misma bancada y la unión entre bancadas se emplea la siguiente fórmula.

$$\Delta P = K1 \cdot L_{eq} \cdot Q^2$$

donde:

ΔP : es la pérdida de carga, en mm.c.a.

$K1$: Factor de rozamiento del cobre, cuyos valores se expresan en la Tabla 9.

Diámetro	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1"1/4	1"1/2
$K1$	4,68	0,53	0,30	0,12	0,04	0,0116	4,991E-03

1"3/4	2"1/2	3"	3"1/2	3"3/4	3"7/8	5"1/2	6"1/2
2,425E-03	4,568E-04	1,946E-04	9,455E-05	6,845E-05	5,871E-05	1,140E-05	5,214E-06

Tabla 9: Coeficientes de rozamiento de tuberías de cobre

L_{eq} : es la suma de la longitud real de la tubería y las longitudes equivalentes de codos, derivaciones en Tee, válvulas, etc.

Q : caudal que circula por cada tramo, en l/min.

Finalmente, para seleccionar la bomba es necesario el caudal total de la instalación, 27.687,5 l/h y las pérdidas de carga más desfavorables de los diferentes bloques, que corresponden a las del bloque 4 con 1,605 mca. Siguiendo con los criterios de selección, previamente comentados, la bomba del fabricante Sedical que ofrece unas mejores condiciones económicas es la SAP 50/9 T y la más silenciosa de las posibles conforme a estos datos es la SIM 80/190.1-0.37/K. Las hojas de características de estas bombas se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*.

Las tablas donde se representan todos los resultados se hallan en el *Anexo 7: Resultados*, y no se incluyen en su totalidad en la memoria debido a la enorme extensión de cada una de ellas. En esta memoria, se incluye la Tabla 10 como resumen de los resultados:

	Potencia Transmitida (kW)	Caudal (l/h)	Pérdidas de carga (m.c.a)	Diámetro de la acometida de cada bloque (mm)	Diámetro unión radiadores en cada bancada (mm)
BLOQUE 1	91,543	11244,745	1,078	90	15
BLOQUE 2	16,732	2055,218	0,675	40	10
BLOQUE 3	16,732	2055,218	1,141	40	10
BLOQUE 4	100,397	12332,303	1,305	90	17
TOTAL	225,404	27687,483	1,605	159	-

Tabla 10: Resumen de resultados de la instalación de radiadores de BT

Para finalizar el cálculo de la instalación de baja temperatura (suelo radiante y radiadores de BT) es necesario calcular el grupo de bombas que impulsan todo el caudal del circuito primario, es decir, desde el grupo generador

de calor hasta los colectores de impulsión/retorno. Como se colocan tres calderas, se divide todo el caudal en tres bombas, gracias a esto los diámetros serán más pequeños que si se planteara una única bomba de impulsión.

El caudal total que se debe impulsar se obtiene como suma de todos los ramales que acometen el secundario y que han sido comentados en las páginas anteriores. El caudal total de la instalación es de 85.899 l/h, que se divide en tres caudales que deberán impulsar cada bomba. Para dimensionar las pérdidas de carga se ha de escoger la más desfavorable de los 13 ramales del secundario. Esta es la acometida de la región TR2 con 15,6 m.c.a. Pero aplicando un coeficiente de seguridad para asegurar la circulación de agua a todos los circuitos se toma como pérdida de carga 20 m.c.a. El diámetro del circuito primario es de 159 mm para unas condiciones de caudal 28,63 m³/h y una velocidad de 0,5 m/s.

Con estos datos, se selecciona la bomba del fabricante Sedical SIM 50/265.1-3.0/K. Esta bomba cumple con los dos supuestos iniciales a la hora de elegir una bomba: es la más económica y la más silenciosa de las posibilidades que ofrece el fabricante para el caudal y pérdidas de carga calculados.

Las hojas de características de las bombas se añaden en el *Anexo 10: Fabricantes*.

8.2 Cálculo y dimensionado de la instalación de alta temperatura

Con la instalación de baja temperatura únicamente se cubren 901,5 kW (suma de la potencia que emite el suelo radiante y los radiadores de baja temperatura) de los 1.142,91 kW que son necesarios cubrir para garantizar las condiciones internas de 21°C y 50% de humedad. Por tanto, es necesario una instalación adicional para poder hacer frente al resto de pérdidas de calor.

En un primer momento se intento realizar esta instalación en baja temperatura pero el número de emisores era tan elevado que era inviable llevarla a cabo. Por tanto, se decide realizar una instalación a parte de la de baja temperatura.

Para este caso, se elige el modelo “Terraline” del fabricante Zehnder cuya instalación se realiza al ras del suelo; en la Figura 38 se muestra un corte transversal del radiador una vez colocado en el suelo.

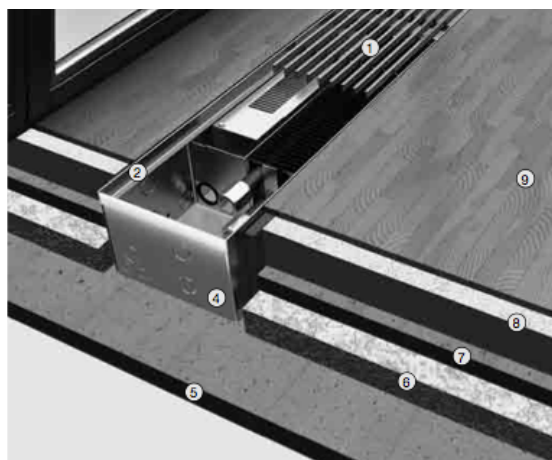


Figura 38: Sección Transversal del radiador Terraline

La temperatura de entrada a este elemento será de 75°C y la de retorno será de 65°C. El salto térmico que se produce en este radiador es de 49°C.

Se instalarán a lo largo del perímetro de la Catedral, tal y como se muestra en la Figura 40 correspondiente al plano 18 del *Anexo 8: Planos y Esquemas*. Se utilizan dos tipos de este tipo de radiador, cuya diferencia radica en la longitud y la potencia calorífica que emite cada uno: uno de ellos será de 4 metros de largo, emitiendo 2316W y el otro de 3,8 metros, cuya potencia de emisión serán 2191W.

La distribución esquemática de la instalación, que se muestra en la Figura 39, divide la instalación en tres ramales.

- 1^{er} Ramal: Abarca la zona derecha de la planta de la Catedral colocando 44 radiadores de 4 metros y 7 de 33,8 metros.
- 2^o Ramal: Abarca la zona izquierda de la planta de la Catedral colocando 45 radiadores de 4 metros y 7 de 33,8 metros (simétrica a la anterior).
- 3^{er} Ramal: zona central del ábside distribuyendo 6 radiadores Terraline, (dos de ellos de 3,8 metros).

El segundo y tercer ramal comparten la misma bomba, ya que las pérdidas de presión y el caudal que circula por el tercer ramal son demasiado bajas.

Gracias a todos estos elementos emisores se consigue una potencia calorífica de 250,44 kW, suficiente para que, con la instalación de baja temperatura, abordar todas las pérdidas caloríficas que tiene la Catedral.

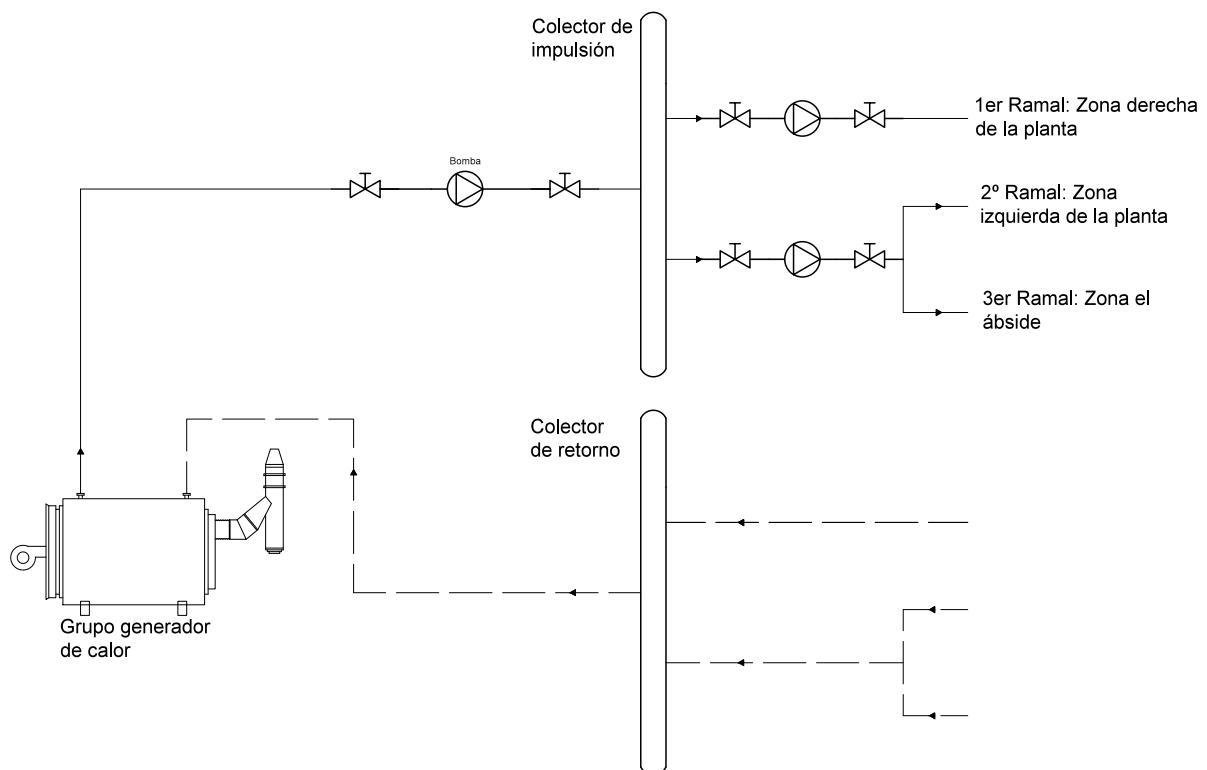


Figura 39: Esquema simplificado de la instalación de alta temperatura

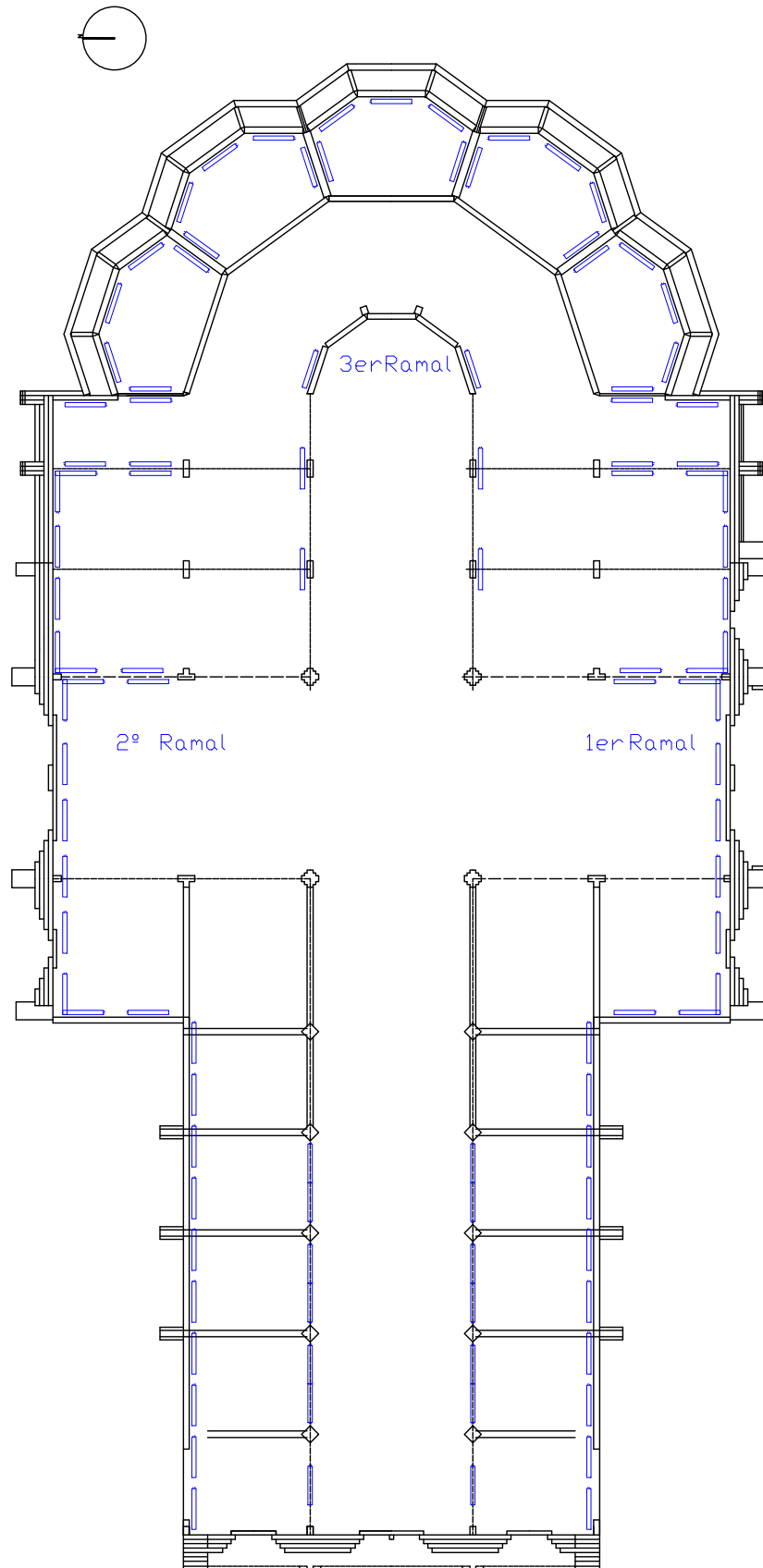


Figura 40: Distribución de los radiadores Terraline en la planta

Cada radiador Terraline estará conectado, al igual que en la instalación de radiadores de baja temperatura, en conexión bitubo.

Una vez que se ha proyectado la instalación, cuyo esquema completo corresponde al plano 29 del *Anexo 8: Planos y Esquemas*, se procede al cálculo del

caudal que recorre la instalación y las pérdidas de carga para dimensionar el grupo de impulsión perfectamente y garantizar el flujo de agua en cada radiador.

Ramal 1

Los radiadores “Terraline” que componen esta instalación se distribuyen de la siguiente manera sobre la planta de la Catedral:

- 2 radiadores en la capilla de la Virgen Blanca.
- 5 radiadores en la capilla de San Antonio.
- 5 radiadores en la presacristía.
- 4 radiadores en la capilla del Santo Cristo.
- 8 radiadores en la capilla de la Virgen del Carmen.
- 10 radiadores en la región del crucero.
- 17 radiadores en la región del trascoro (7 de ellos serán de 3,8 metros).

Tanto el caudal como el diámetro de la instalación del primer ramal, se realizan conforme a las ecuaciones expuestas en la página 49 de este documento.

Las pérdidas de carga se calculan según la expresión descrita en la página 58 de la memoria escrita.

La Figura 41 muestra una instalación esquemática de la situación de los radiadores y cómo se unen entre sí. El esquema se observa con mayor claridad en el plano 19 del *Anexo 8: Planos y esquemas*.

A la hora de calcular el caudal circulante entre los tramos que unen los radiadores, siempre se procede desde el total de los radiadores hasta que sólo queda uno. Al haber varios tramos en paralelo, es necesario agrupar los que conforman cada rama, la cual está conectada en serie. Así pues, la definición de las divisiones o ramas que aparecen en la tabla de resultados es la siguiente. Partiendo de la potencia 117,241 kW total que emiten todos los radiadores.

- DIV 1: radiadores XVII a LI, todos ellos transmiten una potencia de 80,185 kW.
- DIV 2: radiadores XV y XVI transmitiendo, en conjunto, 4,632 kW.
- DIV 3: radiadores de XIX a LI, aportando 75,553 kW.
- DIV 4: radiadores XVII y XVIII, emitiendo 4,632 kW
- DIV 5: radiadores de XXV A LI, en total, emiten 61,657 kW.
- DIV 6: radiadores XXIII y XXIV, al igual que la DIV 2 y la DIV 4, transmiten 4,632 kW.
- DIV 7: radiadores de XVII a LI, transmitiendo 57,025 kW.
- DIV 8: radiadores XXV y XXVI, similar a la DIV 2, DIV 4 y DIV 6, 4,632 kW.
- DIV 9: radiadores de XLV a LI, lo conforman los 7 radiadores de 3,8 metros que, en total, transmiten 15,337 kW.
- DIV 10: radiadores de XXXVII a XLIV, radiando una potencia calorífica igual a 18,528 kW.

La tabla de resultados se encuentra a disposición del lector en el *Anexo 7: Resultados* y en esta memoria únicamente se representan los datos significativos de caudal y pérdida de carga, así como los diámetros de las tuberías.

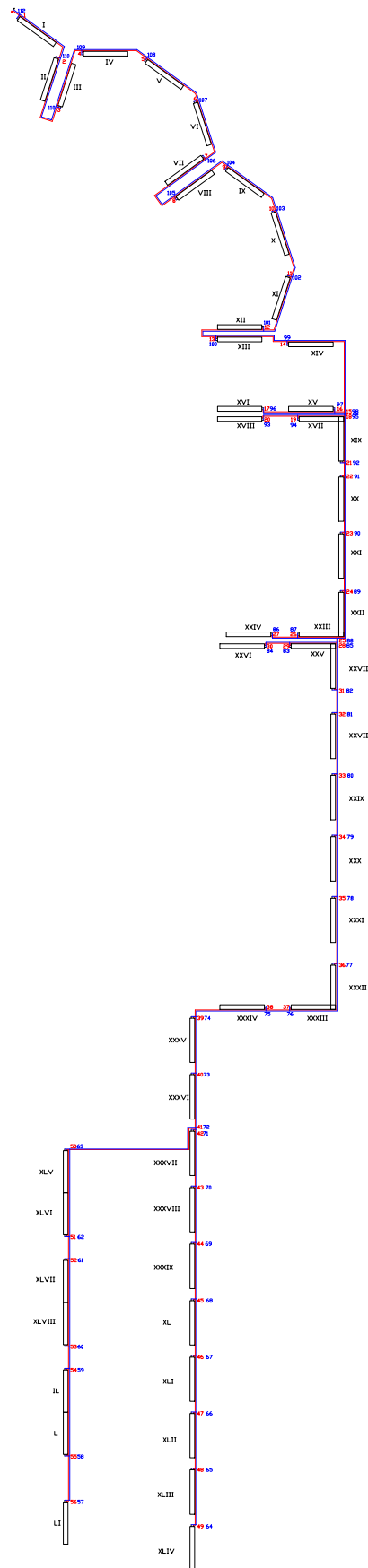


Figura 41: Esquema de la instalación del 1er Ramal de Alta Temperatura

El caudal circulante total de la instalación son 10080,91 l/h, y los diferentes elementos que componen el ramal 1 crean unas pérdidas de carga equivalentes a 1248,41 mm.c.a. De la intersección de estos dos resultados se selecciona la bomba del fabricante Sedical cuyo modelo más económico será la bomba SAP 40/8 T y la menos ruidosa será la SIM 50/150.1-0.20/K, cuya hoja de características se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*.

Por último, se seleccionan los diámetros de las tuberías de cobre que enlazan todos los elementos formando el conjunto de esta instalación: el diámetro de la acometida principal (desde el colector de ida hasta el primer radiador) es de 90 mm. Los diámetros de los ramales DIV 2, DIV 4, DIV 6 y DIV 8, al transmitir la misma potencia, por ellos circulará el mismo caudal por una tubería de diámetro de 20 mm. El diámetro de la entrada y salida de los radiadores será de 15 mm. Finalmente, el diámetro del resto de ramales será el mismo que el de la acometida principal, porque, aunque el diámetro teórico calculado es menor de 90 mm, se toma este diámetro para que la instalación sea más cómoda de realizar y únicamente halla dos cambios en el tamaño de las tuberías.

Ramal 2

Como en el caso del Ramal 1, primero se define el número de radiadores “Terraline” que se disponen en las diferentes regiones que componen este ramal:

- 3 radiadores en la capilla de la Virgen Blanca.
- 5 radiadores en la capilla de la Virgen de la Esperanza.
- 5 radiadores en la capilla del Nacimiento.
- 4 radiadores en la entrada a la Capilla de la Virgen del Camino.
- 8 radiadores en la capilla de Santa Teresa.
- 10 radiadores en la región del crucero.
- 17 radiadores en la región del trascoro (7 de ellos serán de 3,8 metros).

Tanto el caudal como el diámetro de la instalación del segundo ramal, se realizan conforme a las expresiones enunciadas en la página 49 de este documento.

Las pérdidas de carga se pueden obtener según la ecuación descrita en la página 58 de la memoria escrita.

La Figura 42 muestra la instalación esquemática de la situación de los radiadores y cómo se unen entre sí. El esquema se puede ver en mayor detalle en el plano 19 del *Anexo 8: Planos y Esquemas*.

Se definen, al igual que en el Ramal 1, las diferentes divisiones pues hay ramas que están unidas entre sí en serie, pero se enlazan con el resto de la instalación en paralelo. Por tanto, la definición de las divisiones o ramas que aparecen en la tabla de resultados es la siguiente. Partiendo de la potencia 119,557 kW total que emiten todos los radiadores.

- DIV 1: radiadores XVIII a LII, todos ellos transmiten una potencia de 80,185 kW.
- DIV 2: radiadores XVI y XVII transmitiendo, en conjunto, 4,632 kW.
- DIV 3: radiadores de XX a LII, aportando 75,553 kW.
- DIV 4: radiadores XVIII y XIX, emitiendo 4,632 kW
- DIV 5: radiadores de XXVI A LII, en total, emiten 61,657 kW.
- DIV 6: radiadores XXIV y XXV, al igual que la DIV 2 y la DIV 4, transmiten 4,632 kW.

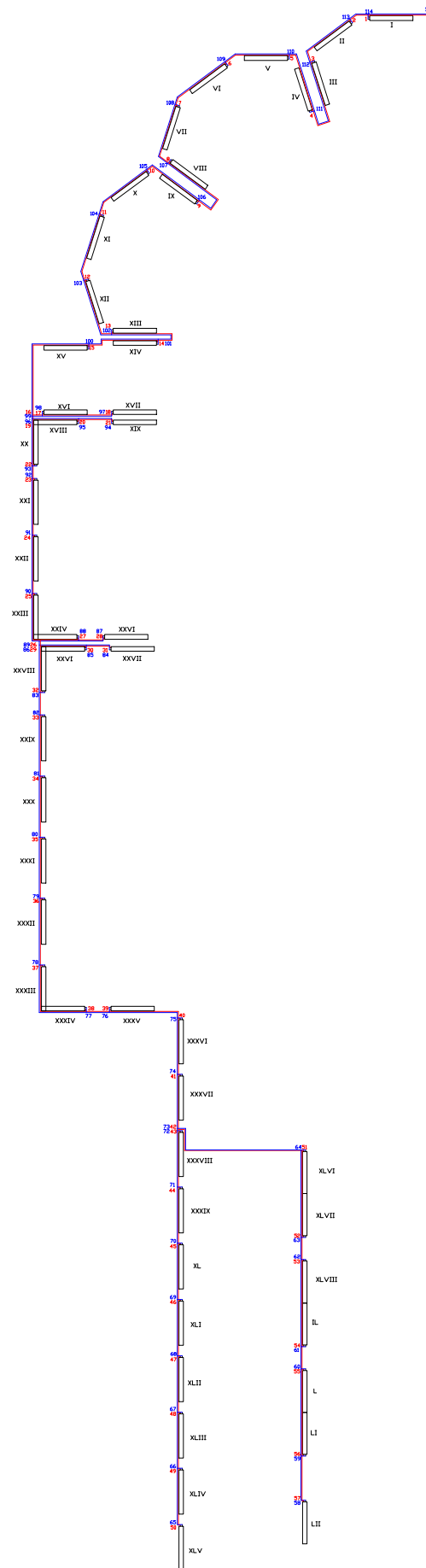


Figura 42: Esquema de la instalación del 2º Ramal de Alta Temperatura

- DIV 7: radiadores de XVIII a LII, transmitiendo 57,025 kW.
- DIV 8: radiadores XXVI y XXVII, similar a la DIV 2, DIV 4 y DIV 6, 4,632 kW.
- DIV 9: radiadores de XLVI a LII, lo conforman los 7 radiadores de 3,8 metros que, en total, transmiten 15,337 kW.
- DIV 10: radiadores de XXXVIII a XLV, radiando una potencia calorífica igual a 18,528 kW.

La tabla de resultados se encuentra en el *Anexo 7: Resultados* y en la memoria únicamente se representan los datos significativos de caudal y pérdida de carga, así como los diámetros de las tuberías.

El caudal circulante de la instalación del segundo ramal son 10280,05 l/h, y los diferentes elementos que componen el ramal 2 crean unas pérdidas de carga equivalentes a 1992,64 mm.c.a. Tal y como se ha comentado, la bomba del segundo ramal es la misma que la del ramal 1, por lo que la seleccionada se mostrará posteriormente.

Por último, y al igual que en el ramal 1, se debe mencionar los diámetros de las tuberías de cobre que se necesitan para enlazar todos los elementos emisores: el diámetro de la acometida principal (desde el colector de ida hasta el primer radiador) es de 90 mm. Los diámetros de los ramales DIV 2, DIV 4, DIV 6 y DIV 8, al transmitir la misma potencia, menor en comparación con el resto y, por tanto, menos caudal, se instala una tubería de diámetro de 20 mm. El diámetro de las entradas y salidas de cada radiador es de 15 mm, por lo que hará falta un elemento singular que conecte dos tuberías de diámetros distintos. El diámetro del resto de ramales será el mismo que el de la acometida principal, debido al mismo razonamiento que el explicado en el ramal 1.

Ramal 3

Se empieza definiendo qué radiadores componen esta instalación, la más pequeña de las 3, pues solo esta compuesto por 6 radiadores “Terraline”, dos de ellos de 3,8 metros.

- 3 radiadores en corredor sur junto a la girola, el primero de ellos será de 3,8 metros.
- 3 radiadores en corredor norte junto a la girola, siendo el primero de 3,8 metros.

Siguiendo las expresiones de la página 49 y la de la página 58, se calculan el caudal y las pérdidas de carga del tercer ramal, respectivamente.

La Figura 43 muestra la instalación esquemática de la situación de los radiadores y cómo se unen entre sí. El esquema completo se encuentra en el plano 19 del *Anexo 8: Planos y Esquemas*.

En este caso, como puede observarse en la instalación, se halla la acometida principal para posteriormente dividirse en dos ramas de tres radiadores cada una. Ambas transmiten 6,823 kW, y por ellas circula un caudal de 586,67 l/h.

Finalmente y como en los dos casos anteriores, la tabla de resultados se encuentra en el *Anexo 7: Resultados*, mostrándose en esta memoria los datos del caudal total, y pérdida de carga que existen en este circuito. El caudal total de agua caliente que se requiere para que esta instalación funcione conforme a lo dimensionado debe ser de 1173,34 l/h. Debido a los radiadores, tuberías de unión y elementos singulares hacen que exista una pérdida de carga en la circulación del agua igual a 484,108 mm.c.a.

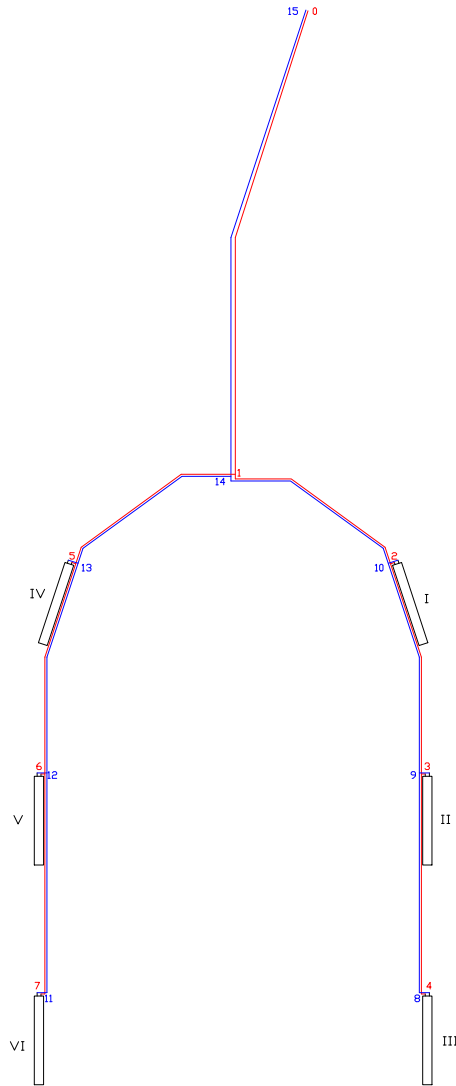


Figura 43: Esquema de la instalación del 3er Ramal de Alta Temperatura

Los diámetros de entrada y salida a los radiadores son de 15 mm. El resto de diámetros de esta instalación son de 30 mm.

Una vez que se tienen los resultados de caudal y pérdidas de carga de los ramales 2 y 3, se selecciona la bomba del fabricante sedical. Esta bomba impulsará un caudal de 11453,3 l/h, suma de los caudales de las ramas 2 y 3, y debe vencer unas pérdidas de carga iguales a 1992,64 mm.c.a, correspondientes al segundo ramal, ya que son mayores que en el ramal 3. La bomba seleccionada, SAM 30/145 – 0.2/K cumple con los dos requisitos de ser la más económica y la más silenciosa de las mostradas por el fabricante para las condiciones de caudal y pérdida de carga comentadas. La hoja de características de la bomba se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*.

Una vez finalizado el cálculo del secundario, es necesario seleccionar la bomba que impulsará todo el caudal de la instalación, desde la caldera hasta el colector de impulsión y el diámetro de la tubería del primario. El caudal se ha obtenido como suma de los tres ramales de la instalación de alta temperatura igual a 21532,2 l/h. Las pérdidas de carga se toman las más desfavorables, correspondientes a las del ramal 2. Con estas dos condiciones, y asumiendo que la temperatura de trabajo es de 75°C, la bomba más económicas proporcionadas por

el fabricante es el modelo SAP 50/9 T y la más silenciosa es la SIM 65/190.1 – 0.37/K. La hoja de características de ambas bombas están en el *Anexo 10: Fabricantes*. El diámetro de la tubería del primerio, para una velocidad de 0,5 m/s, es de 133 mm.

Por último, para acabar con la instalación de radiadores de alta temperatura, en ningún caso se ha sobrepasado los 15 mm.c.a/m en las tuberías de enlace entre radiadores y es necesario incorporar una válvula de equilibrado a la entrada de la acometida principal de cada ramal, para asegurar que circula el caudal de agua dimensionado.

Es importante recalcar que antes de comenzar cada ramal se instala una válvula de equilibrado para garantizar que las pérdidas de carga son similares y garantizar la circulación de agua por todos y cada uno de los radiadores.

8.3 Cálculo y selección de los grupos generadores de calor

Al tener una instalación de baja temperatura y otra instalación de baja temperatura, se hace necesario tener dos grupos generadores de calor independientes.

8.3.1 Grupo generador de calor de baja temperatura

La potencia instalada en esta instalación, suma de la potencia calorífica del suelo radiante y de los radiadores en los bancos, asciende a 901,49 kW. Al estar muy por encima de los 400 kW que dicta el RITE, se proponen 3 calderas de condensación que usan combustible gas natural. La ventaja de estas calderas es que tienen un rendimiento por encima del 100%, ya que aprovechan el calor latente debido a la condensación de agua en su interior.

Se seleccionan tres calderas del fabricante FERROLI, modelo Roof Top 375, que aportan cada una de ellas 375kW. (la hoja de características se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*)

Estas tres calderas forman, lo que se ha denominado durante la redacción de este proyecto, grupo generador de calor de baja temperatura, estarán conectadas hidráulicamente entre sí en paralelo y perfectamente independizados.

Con el objetivo de ahorrar en combustible se incorpora una instalación de colectores solares que pueda cubrir un porcentaje de la demanda y así dotar de una energía de carácter renovable.

8.3.2 Grupo generador de calor de alta temperatura

La potencia instalada correspondiente a los radiadores “Terraline” es de 250,4 kW, por lo que únicamente será necesaria una caldera.

Se elige una caldera del fabricante TATANO, modelo Kalorina K2223, que rinde una potencia de 267 kW (la hoja de características se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*). Utiliza como combustible sólidos picados procedentes de fuentes energéticas renovables, como pellet, cascarón de almendras, cascarón de avellanas, cascarón de pistacho o cascarón de piñones.

Dicha caldera se localizará en el mismo cuarto de calderas que el grupo generador de baja temperatura.

Para concluir este apartado de grupos generadores de calor necesarios para dotar de agua caliente a la instalación de calefacción, se recalca que, aun no consiguiendo una energía 100% renovable, porque es imposible, ya que la

tecnología en calderas de condensación y de baja temperatura está en fase de investigación y es necesario un combustible derivado del petróleo, sí que ambos grupos cuentan con un aporte en energía renovable, en el caso del grupo de alta temperatura es del 100%, pues se utiliza como combustible biomasa; sin embargo, para dotar a la instalación de baja temperatura de un carácter renovable, se propone una aportación de calor proveniente del sol.

8.3.3 Descripción de la sala de calderas

Los grupos generadores de baja y alta temperatura estarán situados en la sala de calderas localizada bajo las capillas de la girola (Figura 44), pues se aprovecha la antiguo cuarto de máquinas de la Catedral. Además, consta de entrada independiente. La sala de calderas tiene una superficie total de 182,25 m² y 2 metros de altura.

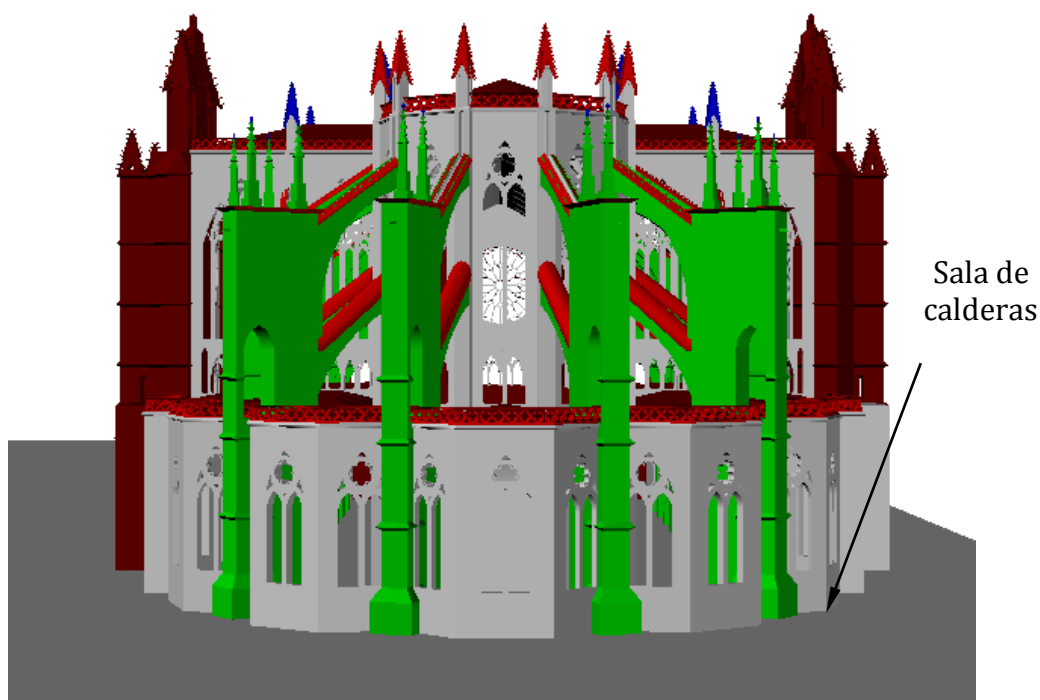


Figura 44: Localización de la sala de calderas

La distribución de la sala de caldera se encuentra en el plano 20 del *Anexo 8: Planos y esquemas*, y la Figura 45 muestra un diagrama de bloques de los diferentes elementos que componen el cuarto.

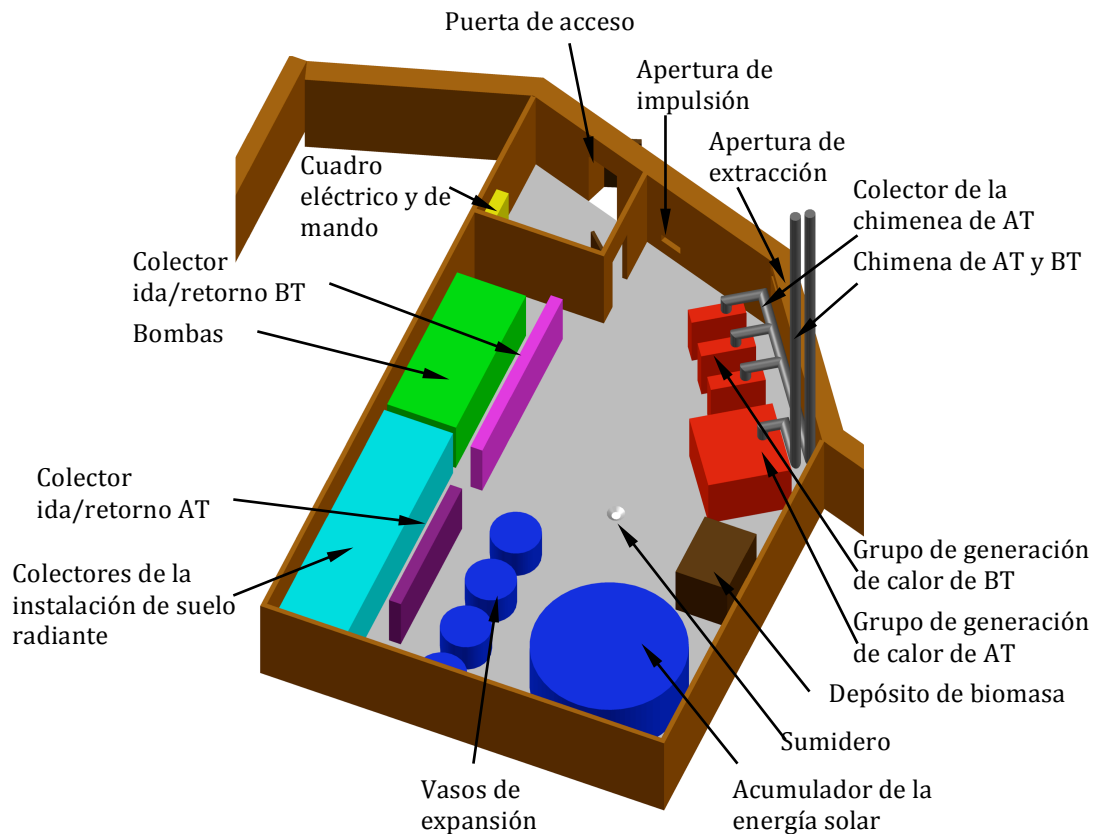


Figura 45: Diagrama conceptual de la sala de calderas

La sala de calderas, según la norma UNE 60-601, dictamina que, por tratarse de un lugar de culto, es necesaria una sala de calderas de seguridad elevada cumpliendo con los siguientes requisitos:

- Ningún punto de la sala está a más de 7,5 metros de la salida, pues el cuarto donde se instalarán los grupos generadores tiene más de 100 m².
- El acceso a dicho cuarto se hace mediante una puerta de 1 metro de ancho por 2 metros de alto, abriendo hacia fuera. El lugar de disposición de la puerta de la sala de calderas asegura que no exista una escalera cercana, ni salidas o escapes de humos o fuegos. Además la resistencia al fuego de dicha puerta debe ser mayor o igual a RF-90.
- Se construirá un tabique como elemento de separación cuya función es servir de protección entre la entrada a la sala y el total de los equipos.
- El cuadro eléctrico de protección y mando se situará en el espacio entre el tabique instalado y la puerta.
- Se debe instalar un sistema de ventilación forzada, pues el grupo generador de baja temperatura usa como combustible gas natural. Este sistema de ventilación impulsará 4606,5 m³/h de aire. La ecuación con la que se determina este valor es:

$$Q = 10 \cdot \text{Sup. sala} + 2 \cdot \sum \text{Consumo de los equipos}$$

- La superficie que debe tener el hueco para la rejilla de extracción es igual 1822,5 cm², diez veces la superficie del cuarto. El plano 21 del Anexo 8: Planos y esquemas muestra las dimensiones de la rejilla.
- Por tratarse de una sala de calderas cuya potencia nominal conjunta es mayor de 600 kW, se debe garantizar que la resistencia al fuego de paredes y techos debe ser de RF-120, la estabilidad al fuego será EF-120 y la reacción al fuego será M1 (según UNE 23093).

- Se colocarán extintores de eficacia mínima 89B. Uno de ellos en el hueco entre el tabique y la puerta de acceso y otro en el interior del propio cuarto, donde se garantiza que entre ambos habrá menos de 15 metros.
- Por último, se debe instalar el un cartel en la puerta de acceso y visible donde se pueda leer: “Sala de máquinas. Calderas a gas. Prohibida la entrada a toda persona ajena al servicio”.

[24]

8.3.4 Chimenea

Es importante recalcar que, al existir dos generadores de calor, uno de baja temperatura y otro de alta, se deben instalar dos tipos de chimenea: para baja temperatura se propone un colector común propio de la conexión de calderas en cascada y para alta temperatura se resuelve mediante la instalación típica de caldera central. Ambas instalaciones se calculan de acuerdo al software de cálculo de chimeneas del fabricante “Dinak” según la norma EN13384-1.

Baja Temperatura

Primero se procede a la introducción de los datos del emplazamiento de la Catedral de León, altura sobre el nivel del mar y condiciones meteorológicas. Posteriormente, el fabricante solicita los datos de cada una de las calderas y el tipo. Se recuerda que la potencia de cada una de las tres calderas de condensación que funcionan con gas natural tiene una potencia de 375 kW y un rendimiento de 107%, así como la temperatura de salida de los gases, 130°C.

La siguiente pestaña a completar son las dimensiones de los tubos que enlazan la salida de los gases de cada una de las calderas con el colector principal. Datos como el diámetro de salida, 150mm y la conexión a colector que se hará por medio de una “Tee”.

A continuación, se deben introducir los datos de colector: la distancia mínima entre las calderas será de 1,5 metros y la distancia entre el inicio de la chimenea y la conexión a la última de las calderas será 7 metros y medio. El colector tendrá un diámetro de 650 mm y serán necesarias 4 “Tees” del mismo diámetro.

Finalmente se introduce la longitud y altura de la caldera, 15 metros, que, en este caso es la misma ya que se coloca en posición vertical. La intención es colocar la chimenea de tal forma que se adapte a uno de los arbotantes de la girola para ayudar a disimular el conducto.

Con todos estos datos se obtiene el dimensionado de la instalación de acuerdo a los elementos que el fabricante tiene disponibles en catálogo.

- CONDUCTO DE UNIÓN: T600 N1 D V2 G(XX) que tiene un diámetro interno de 150 mm y externo de 210 mm, la velocidad de salida de los gases será de 15,2 m/s a potencia nominal y de 10,1 a potencia mínima de funcionamiento.
- COLECTOR: T600 N1 D V2 G(XX), con un diámetro interno igual al introducido (650 mm) y externo de 710 mm. Se consigue una velocidad de salida de los gases de 2,5 m/s y 1,7 m/s cuando se trabaja a potencia nominal y mínima, respectivamente.
- CHIMENEA: T600 N1 D V2 G(XX). El diámetro interno de la chimenea coincide con el introducido en los datos de tamaño de la misma y un

diámetro externo que coincide con el del colector. La velocidad de los gases a potencia nominal será de 2,4 m/s y cuando la caldera trabaje a potencia mínima será de 1,6 m/s.

Se hace una comprobación de que cumple con los requisitos de caudal, presión y temperatura a potencia nominal y mínima de la caldera que marca la norma de cálculo.

Toda esta información y adicional se puede contemplar en el *Anexo 10: Fabricantes*.

Alta Temperatura

Al igual que ocurre en el caso de la chimenea de baja temperatura y siguiendo las instrucciones del programa facilitado por la empresa se van introduciendo los datos necesarios para el cálculo de la instalación: primero, los datos meteorológicos y geográficos de la Catedral, después potencia nominal (267 kW), rendimiento de la caldera (90%) y tipo de combustible utilizado (biomasa-pellets), así como la temperatura de los gases (80°C). Son necesarios, también las condiciones atmosféricas de la localización del sitio.

Una vez introducidos los datos de la localización y el tipo de caldera a emplear, se debe suministrar al programa de las longitudes de los tramos horizontal y vertical.

Calculando la instalación y comprobando los requisitos mínimos de caudal, presión y temperatura a potencia nominal y mínima se concluye que la instalación consta de:

- CONDUCTO DE UNIÓN: T600 N1 D V2 G(XX) con un diámetro interno de 350 mm y externo de 410 mm. Se consigue una velocidad de salida de los gases de 2,4 m/s a potencia nominal y de 0,7 m/s a potencia mínima.
- TRAMO VERTICAL: T600 N1 D V2 G(XX). Los diámetros y velocidades de salida de los gases coinciden con los del conducto de unión.

La instalación de la chimeneas y los datos de la misma se encuentran en el *Anexo 10: Fabricantes*.

[25]

8.4 Vasos de expansión

Para poder seleccionarlos, es necesario haber calculado previamente el volumen de agua de las instalaciones. Al tener dos instalaciones independientes, habrá al menos uno vaso de expansión en cada una.

8.4.1 Vaso de expansión de la instalación de baja temperatura

Como se ha comentado en la introducción del apartado 8.4, es necesario calcular, primero, el volumen de esta instalación. Para ello se procede calculando el volumen que recorre los tubos de suelo radiante y los elementos emisores de baja temperatura. Seguidamente, se calcula el volumen que circula por las tuberías que enlazan estos elementos, para finalizar con el dato del fabricante del volumen de la caldera.

Volumen de los circuitos de suelo radiante

Para hacer el cálculo del volumen que recorre cada circuito por cada colector que forman parte de esta instalación es necesario conocer tanto el diámetro de los tubos como la longitud de los mismos. Se hace una aproximación en cuanto a la distancia que hay entre el colector y cada uno de los circuitos de los que se compone, pues únicamente se conoce el dato del circuito más alejado en cada colector. La distancia a cada circuito se aproxima, por tanto, como el cociente entre la distancia más alejada y el número de circuitos de los que se compone cada colector.

El volumen que recorre cada tubo se calcula mediante la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V_i = \pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \cdot L_i$$

Donde:

V_i : Volumen del tramo considerado, en m^3 .

D_i : Diámetro del tramo considerado, en m.

L_i : Longitud del tramo considerado, en m.

La distancia que se tienen en cuenta para el cálculo del volumen en esta primera parte que sólo incluye suelo radiante son las que se ven reflejadas en la Figura 46 donde se toma uno de los tramos de la región GI1, como caso general. Las dimensiones que aparecen en la Figura 46 están en metros y hacen referencia a dos tuberías (ida y retorno) pero únicamente se muestran en conexión unifilar para facilitar la lectura del dibujo.

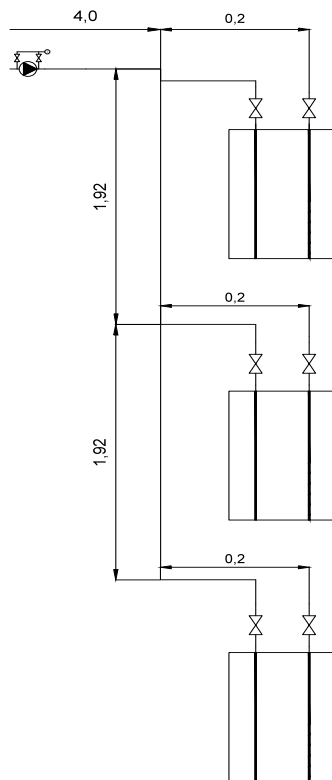


Figura 46: Dimensiones de las tuberías de una conexión genérica

A continuación se representa la Tabla 11 con los volúmenes de cada tramo, así como el volumen total de agua que es necesario para el suelo radiante.

Región	GI1	GI2	AM1	AM	AM2	CR1	TOTAL SUELO RADIANTE
Volumen (l)	6658	6573	7058	7147	7295	997	
Región	CR	CR2	CO	TR1	TR	TR2	
Volumen (l)	1899	1103	639	7470	7650	7650	62138

Tabla 11: Capacidad de la instalación de suelo radiante

Volumen de los radiadores de baja temperatura

La ecuación para calcular el volumen de agua que circula por cada tubería que enlaza las bancadas entre sí, y cada bloque de bancadas con la toma principal es la misma que la empleada para calcular el volumen que circula por los tubos del suelo radiante.

El único dato que se necesita para cerrar la instalación del secundario de baja temperatura es la capacidad que tiene cada radiador empleado. Este dato se recoge en la hoja de características del modelo elegido y que se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*. La capacidad del radiador KLEO HD-22 de 2200 mm es 4,62 litros y la del radiador KLEO HD-22 de 2100 mm es 4,41 litros. La Tabla 12 muestra el volumen de agua que circula por cada bloque de bancadas y el total de esta parte del secundario.

Región	1 ^{er} Bloque	2º Bloque	3 ^{er} Bloque	4º Bloque	TOTAL
Volumen (l)	1407	245	307	1810	3769

Tabla 12: Capacidad de la instalación de radiadores de baja temperatura

Para acabar de calcular el volumen de agua que circula por la instalación de baja temperatura, falta por hallar el que transcurre por el primario, es decir, por la tubería que une los grupos generadores de calor con los colectores de ida/retorno, así como la capacidad de agua que tienen estos. La capacidad de agua que pueden albergar las calderas de baja temperatura, al no proporcionar el fabricante este valor, se estima en 800 litros. La distancia entre las calderas y el colector de ida/retorno es de 2 metros en total (1 de ida y 1 de vuelta) y el diámetro de los conductos es de 159mm. El volumen total del primario considerando los tres ramales que unen las calderas con los colectores y la capacidad de cada una de ellas es de 2519,1 litros.

El volumen total de la instalación de baja temperatura, sumando todos los volúmenes y considerando que el coeficiente de dilatación del agua para 50°C es 1,21%, es 70635 litros.

El vaso de expansión se elige conforme al fabricante “Sedical” considerando que se tiene una presión estática de 15 metros (altura desde la sala de calderas hasta el inicio de la instalación). Para hacer frente al volumen de expansión, 1500 litros, son necesarios 3 vasos del tipo S500, cuya hoja de características se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*. La situación de estos vasos de expansión se puede observar en el plano 22 del *Anexo 8: Planos y esquemas*. Una extracción de este plano donde se muestran los vasos de expansión se muestra en la figura (aparecen en un círculo rodeados).

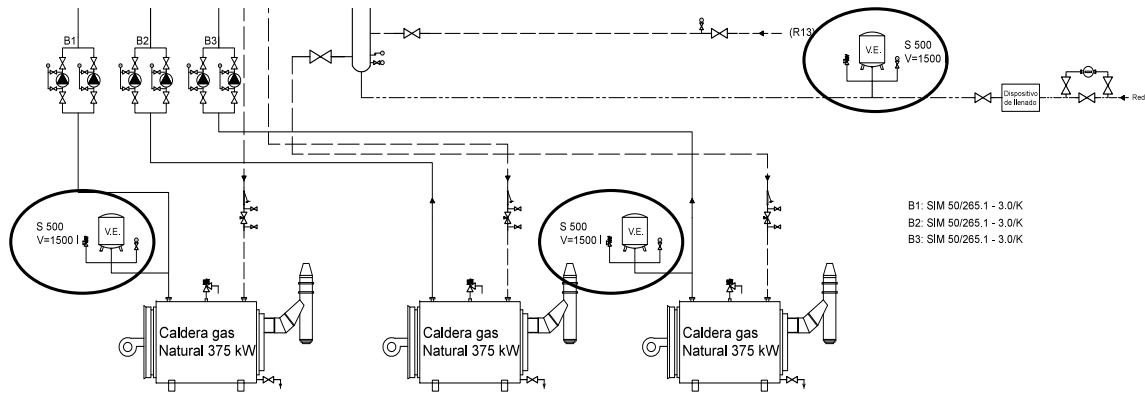


Figura 47: Situación de los vasos de expansión de baja temperatura

Todos los resultados de los vasos de expansión de baja temperatura que aparecen en la memoria se hallan extendidos en el anexo de resultados correspondiente.

8.4.2 Vaso de expansión de la instalación de alta temperatura

Al igual que en el caso de baja temperatura, también necesitamos un vaso de expansión en la de alta, para poder absorber las fluctuaciones que sufra el agua por el interior de los conductos.

Se hace necesario tomar del modelo "Terraline" del fabricante "Zehnder" el volumen de agua que pueden albergar los radiadores que, de este tipo han sido elegidos: el modelo de 4 metros albergará 7,4 litros y el de 3,8 metros 7 litros.

Aplicando la expresión para el cálculo del volumen en conductos y considerando el número de radiadores que tiene cada ramal, se obtienen los resultados de la Tabla 13 que hacen referencia al secundario.

	Volumen Terraline 4 m	Volumen Terraline 3,8 m	Volumen conductos de 90 mm	Volumen conductos de 30 mm	Volumen conductos de 20 mm	Volumen de la región
1er Ramal	325,60	49,00	3254,66	-	16,96	3646,22
2º Ramal	333,00	49,00	3338,54	-	16,96	3737,50
3er Ramal	29,60	14,00	-	110,30	-	153,90
TOTAL						7537,62

Tabla 13: Capacidad del secundario de la instalación de baja temperatura

Al volumen total del secundario falta por incorporar el del primario, es decir, la capacidad de la caldera de biomasa, 920 litros (fabricante de la caldera de alta temperatura, anexo correspondiente), y el volumen que transcurre los conductos que comunican la caldera con el colector de ida/retorno cuya longitud y diámetro son, respectivamente, 2 metros (1 metro de ida y 1 metro de vuelta) y 133 milímetros.

El volumen total de la instalación de alta temperatura, sumando todos los volúmenes y considerando que el coeficiente de dilatación del agua para 75°C es 2,59%, es 8705,56 litros.

El vaso de expansión elegido corresponde al modelo S400 del fabricante "Sedical" que para una presión estática de 15 metros (correspondiente a la altura entre la sala de calderas y el inicio de la instalación) se obtiene un volumen de expansión de 400 litros. La hoja de características de este modelo de vaso de expansión se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes* y la situación del vaso se puede

observar en el plano 29 del *Anexo 8: Planos y esquemas*. La Figura 48 muestra un extracto de dicho plano donde se puede ver dónde se colocará este vaso de expansión.

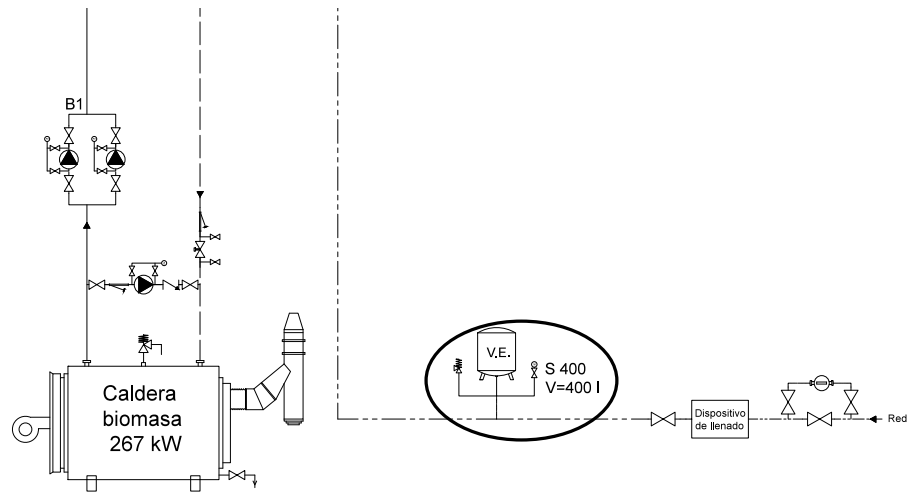


Figura 48: Situación del vaso de expansión de alta temperatura

9. Energía solar

Este capítulo surge de la necesidad de dotar a la instalación de baja temperatura de un sistema de carácter renovable. Considerando que el sistema solar sólo podrá sustituir un 25 % de la demanda de calefacción, se calcula, para dos modelos de colector, plano con cubierta transparente y de tubos de vacío, el número de colectores que se pueden instalar, dado que el área del tejado del Palacio Arzobispal (Figura 49) es limitada, y la cobertura solar que se obtiene; no es necesario cumplir la normativa de contribución solar para la zona climática en la que se encuentra León porque no se trata de una instalación de agua caliente sanitaria.

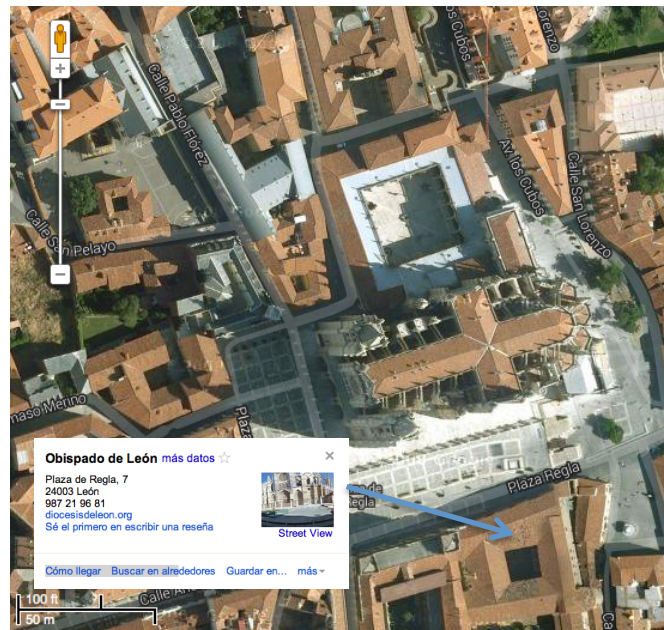


Figura 49: Mapa satélite: Plaza de Regla, 7

Para desarrollar todos estos cálculos se aplicará el método f-chart, consistente en identificar las variables adimensionales (X,Y) del sistema de calentamiento solar y utilizar la simulación de funcionamiento, para dimensionar las correlaciones entre estas variables y el rendimiento medio del sistema para un dilatado periodo de tiempo. Las dimensiones se presentan por medio de ecuaciones y de forma gráfica.

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3$$

Donde:

f: fracción de carga calorífica mensual aportada por el sistema de energía solar. Debe estar entre 0 y 1.

Parámetro X: expresa la relación entre las pérdidas de energía en el captador, para una determinada temperatura, y la carga calorífica de calentamiento durante un mes. Debe estar entre 0 y 18.

Parámetro Y: expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador plano y la carga calorífica total de calentamiento durante un mes.

Es un proceso de cálculo suficientemente exacto para largas estimación, no se puede aplicar para estimaciones de tipo semanal o diario. Para desarrollarlo se usan medios mensuales meteorológicos.

El proceso de cálculo del método f-Chart se describe en el *Anexo 6: Energía solar*.

La temperaturas de entrada y de salida al colector se corresponden con las temperaturas de entrada y salida de agua a la instalación de suelo radiante.

La superficie efectiva donde se instalarán los captadores solares mide 1600 m² (superficie medida en el programa Sigpac del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). Se colcarán los paneles sobre el tejado que se estima con una inclinación de 35°.

El primer inconveniente del método es que es necesario conocer la demanda mensual de calefacción en términos de energía y no de potencia, como se tiene calculado. Aparece la utilidad de los grados-día, indicador de la rigurosidad climática de un sitio ya que relaciona la temperatura media con una cierta temperatura de confort para calefacción. Se obtiene como suma de las diferencias horarias de la temperatura media del aire exterior inferior a una temperatura base de calefacción, con respecto a este valor para todos los días del año.

$$GD = \sum_{i=1}^n \left(TB_c - \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} \right) \cdot N_i \cdot X_c$$

Donde:

TB_c : Temperatura base de calefacción, 21°C.

$T_{m\acute{a}x}$: Temperatura máxima diaria.

$T_{m\acute{i}n}$: Temperatura mínima diaria.

N_i : cantidad de días del mes considerado

X_c : coeficiente lógico que valdrá 1 cuando la temperatura media mensual sea menor a la TB_c y cero cuando sea mayor.

Para León los grados-día del año 2012 se representan en la Tabla 14.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Grados día mensuales 21/21	596	536	405	438	250	130
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Grados día mensuales 21/21	110	99	154	296	434	522

Tabla 14: Grados-día para la localidad de León

Las fórmulas necesarias para recalculer la demanda total de calefacción, tanto para la carga de transmisión como para la de infiltración, son las mismas que las anteriores, sin más que cambiar la diferencia de temperatura para el caso de potencia por los grados día para obtener energía:

$$E_t = \sum k_g \cdot A \cdot GD$$

$$E_v = V_{inf} \cdot c_p \cdot GD$$

Es importante mencionar que para obtener julios como unidad de energía, hay que multiplicar por el factor de conversión correspondiente.

La Tabla 15 muestra los valores mensuales de la demanda de calefacción obtenidos, sin aplicar el porcentaje de demanda que cubrirá la instalación de energía solar.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
$Q_{transmisión}$ (MJ)	2,405E+06	2,163E+06	1,634E+06	1,767E+06	1,009E+06	5,245E+05
$Q_{ventilación}$ (MJ)	3,637E+05	3,271E+05	2,472E+05	2,673E+05	1,526E+05	7,933E+04
Q_{total} (MJ)	2,768E+06	2,490E+06	1,881E+06	2,034E+06	1,161E+06	6,038E+05
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
$Q_{transmisión}$ (MJ)	4,438E+05	3,994E+05	6,213E+05	1,194E+06	1,751E+06	2,106E+06
$Q_{ventilación}$ (MJ)	6,713E+04	6,042E+04	9,398E+04	1,806E+05	2,649E+05	3,186E+05
Q_{total} (MJ)	5,109E+05	4,599E+05	7,153E+05	1,375E+06	2,016E+06	2,425E+06

Tabla 15: Valores de demanda de calefacción en términos de energía

Aplicando el método de f-Chart, cuyas tablas de resultados se encuentran en los apartados A7.5 y A7.6 del *Anexo 7: Resultados*, se pueden resumir los siguientes resultados para cada uno de los dos tipos de colectores empleados

9.1 Colector solar plano.

Se elige como modelo de cálculo el modelo SOL 250 H, del fabricante Baxi Roca, cuya hoja de características se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*.

La curva de rendimiento de este colector muestra los datos de rendimiento óptico y coeficientes de pérdidas (no se tiene en cuenta el término de segundo orden).

$$\eta = 0,812 - 3,641 \cdot \left(\frac{T_{agua,m} - T_{amb}}{G} \right)$$

Con este tipo de colector son necesarios 647 paneles que cubrirían 1539,86 m². Gracias a estos se obtiene una cobertura solar del 22,06%.

9.2 Colector de tubos de vacío.

Se elige como modelo de cálculo el modelo AR30, del fabricante Baxi Roca, cuya hoja de características se encuentra en el *Anexo 10: Fabricantes*.

La curva de rendimiento de este colector muestra los datos de rendimiento óptico y coeficientes de pérdidas (no se tiene en cuenta el término de segundo orden).

$$\eta = 0,832 - 1,14 \cdot \left(\frac{T_{agua,m} - T_{amb}}{G} \right)$$

Para cubrir el 28% de la demanda de calefacción de baja temperatura son necesarios 653 colectores de este tipo que cubren una superficie de 1554,14 m². Se consigue una cobertura solar de 25,79%.

En el plano 30 del *Anexo 8: Planos y esquemas*, se puede observar cómo se acoplaría el sistema solar a la instalación de baja temperatura.

10. Presupuesto

Se suministran dos presupuestos correspondientes con las instalaciones de baja y alta temperatura que tienen calderas independientes. El resultado final es la suma de ambos.

El presente proyecto no tiene en cuenta mano de obra, puesta en marcha de la instalación ni mantenimiento, simplemente se basa en el precio de la cuantía del material necesario para llevarla a cabo. Los resultados se muestran en la, los precios están sin IVA.

10.1 Presupuesto de baja temperatura

En la Tabla 16 y Tabla 17 se muestra un resumen del presupuesto total de la instalación de suelo radiante.

SUELO RADIANTE

DESCRIPCIÓN	PVP (€)
Tubos de 16 mm	226416
530 rollos de 200 m	2,12 €/ml
Elemento de base	106138,12
94 cajas de 72 m ²	15,69 €/m ²
Sistema Portatubos	118788,11
62 cajas de 110,7 m ²	17,56€/m ²
Colectores suelo radiante	12516
12 Entradas 12 Salidas	7 415 €/colector 2905
10 Entradas 10 Salidas	15 359 €/colector 5385
9 Entradas 9 Salidas	5 338 €/colector 1690
8 Entradas 8 Salidas	8 317 €/colector 2536
Tubos de conexión entre colectores y colectores distribuidores	5927
Bombas	
Configuración económica	32218
Configuración silenciosa	33817
Válvulas de equilibrio	1436,04
Válvulas esféricas	8670,7
Elementos singulares (codos, Tees, contracciones)	981,74
Codo	363,4
Tee	399,68
Contracciones	218,66

Tabla 16: Resumen del presupuesto de la instalación de suelo radiante de baja temperatura

RADIADOR KLEO

DESCRIPCIÓN	PVP
Pack de radiador y válvulas	261047,76
2200 mm de longitud	300 586,31 €/pack 175893
2100 mm de longitud	148 575,37 €/pack 85154,76
Tuberías de conexión de diferentes diámetros	1259900,98
Válvulas	7221,58
Equilibrio	2360,34

Antirretorno	97,84
Corte	4763,4
Bombas	
Configuración económica	2774
Configuración silenciosa	2840
Válvulas de corte que aíslan el circuito primario del secundario	4849,6
Seccionadores de flujo	335,59
Sistema de Colector de distribución	2414,5152
Elementos del colector	443,982
Conexiones a tubos	1970,5332
Válvulas de corte de 159 mm	14022
Bombas económicas y silenciosa	33306
Válvulas de equilibrio a 90 mm	555,732
Seccionador de flujo a 159 mm	404,28
Vasos de expansión	5661
Caldera condensación	81270
Contador	1780,69
PRESUPUESTO CON BOMBAS ECONÓMICAS	2698362,53
PRESUPUESTO CON BOMBAS SILENCIOSAS	2700360,53

Tabla 17: Resumen del presupuesto de la instalación de radiadores en los bancos de baja temperatura

10.2 Presupuesto de alta temperatura

La Tabla 18 muestra el presupuesto de la instalación de radiadores "Terraline", donde no se tiene en cuenta el precio de fabricación de los bancos. Finalmente se sumarán ambos presupuestos para obtener el total de la instalación.

RADIADOR TERRALINE

DESCRIPCIÓN	PVP
Pack de radiador, válvulas y rejilla	260248,60
4 m de longitud 93 radiadores 2003,72 €/pack	223615,15
3,8 m de longitud 16 radiadores 1907,992 €/pack	36633,45
Tuberías de conexión a radiadores	4145705,72
1036,38 metros de 90 mm de diámetro 170 rollos 24000,32 €/rollo	4080054,40
156,03 metros de 30 mm de diámetro 26 rollos 2439,92 €/rollo	63437,92
107,98 metros de 20 mm de diámetro 2 rollos 1106,7 €/rollo	2213,40
Válvulas de equilibrio de 90 y 30 mm	2186,59
Válvulas de corte de 90 y 30 mm	6046,05
Seccionador de flujo	64,12
Válvula de 3 vías	586,32
Bombas	
Primer ramal Económica 1 bomba	2774,00
Silenciosa 1 bomba	2840,00
Segundo ramal Económica 1 bomba	2715,00
Silenciosa 1 bomba	2715,00

	Total	Económica	2 bomba	5338,00
		Silenciosa	2 bomba	6622,00
Colector de distribución				538,70
		Elementos del colector		75,95
		Conexiones a tubos		462,75
Tubos a 133 mm				861,12
Caldera			5% del presupuesto	
Vaso de expansión				1339,00
Válvula de corte a 133 mm				3587,92
Contador				1780,69
PRESUPUESTO CON BOMBAS ECONÓMICAS				5586456,81
PRESUPUESTO CON BOMBAS SILENCIOSAS				5588157,81

Tabla 18: Resumen del presupuesto de la instalación de alta temperatura

El presupuesto total puede consultar en el *Anexo 7: Resultados*.

Sumando ambos presupuestos y seleccionando la opción de instalar las bombas más baratas se alcanza un montante de 8.284.819,34; si, por el contrario, se acomete la instalación con bombas silenciosas el resultado final será de 8.288.518,34.

Es importante recordar que este presupuesto sólo tiene en cuenta la instalación, pero el coste de la instalación final en el proyecto de ejecución se encarecerá mucho pues toda la instalación (tanto de suelo radiante como de los radiadores) irá por debajo de la solera de la Catedral, por tanto será necesario levantar todo este suelo para afrontar esta obra.

11. Aproximación numérica del perfil de temperaturas en la sección transversal

Una vez seleccionados los componentes de la instalación se procede a simular en el programa *Therm* y en *Abaqus CAE*, la evolución de las temperaturas en el interior de la Catedral para asegurar que se tienen las condiciones de confort deseadas y la evolución de la temperatura en el interior de los materiales de construcción, respectivamente.

La sección que se va estudiar es el corte norte-sur por la zona del coro de la Catedral, ya que representa las dos alturas de la misma.

Antes de utilizar ambos programas de cálculo, se debe realizar el dibujo de la sección que se quiera estudiar en el programa *AutoCad*.

Los resultados que se obtienen de ambos análisis que se obtienen son los siguientes.

El proceso seguido para obtener los resultados se detalla en mayor profundidad en el *Anexo 9*.

[11] y [26]

11.1 Simulación del calor en el interior del calor con el programa *Therm*

Este proceso es el paso previo a estudiar la transferencia de calor a través de los cerramientos y forjados de los que se compone la Catedral.

El resultado de esta simulación en el programa *Therm* es la distribución de temperaturas en el interior de la sección. Estos valores servirán de entrada en el proceso de definición de las condiciones de contorno en la simulación siguiente.

La evolución de temperaturas se puede observar en la Figura 50.

En esta figura se puede comprobar como una persona de una estatura de 1.8 metros, siente una temperatura entre 22°C y 23°C. Se consigue pues una sensación térmica agradable para una temperatura exterior de 5°C.

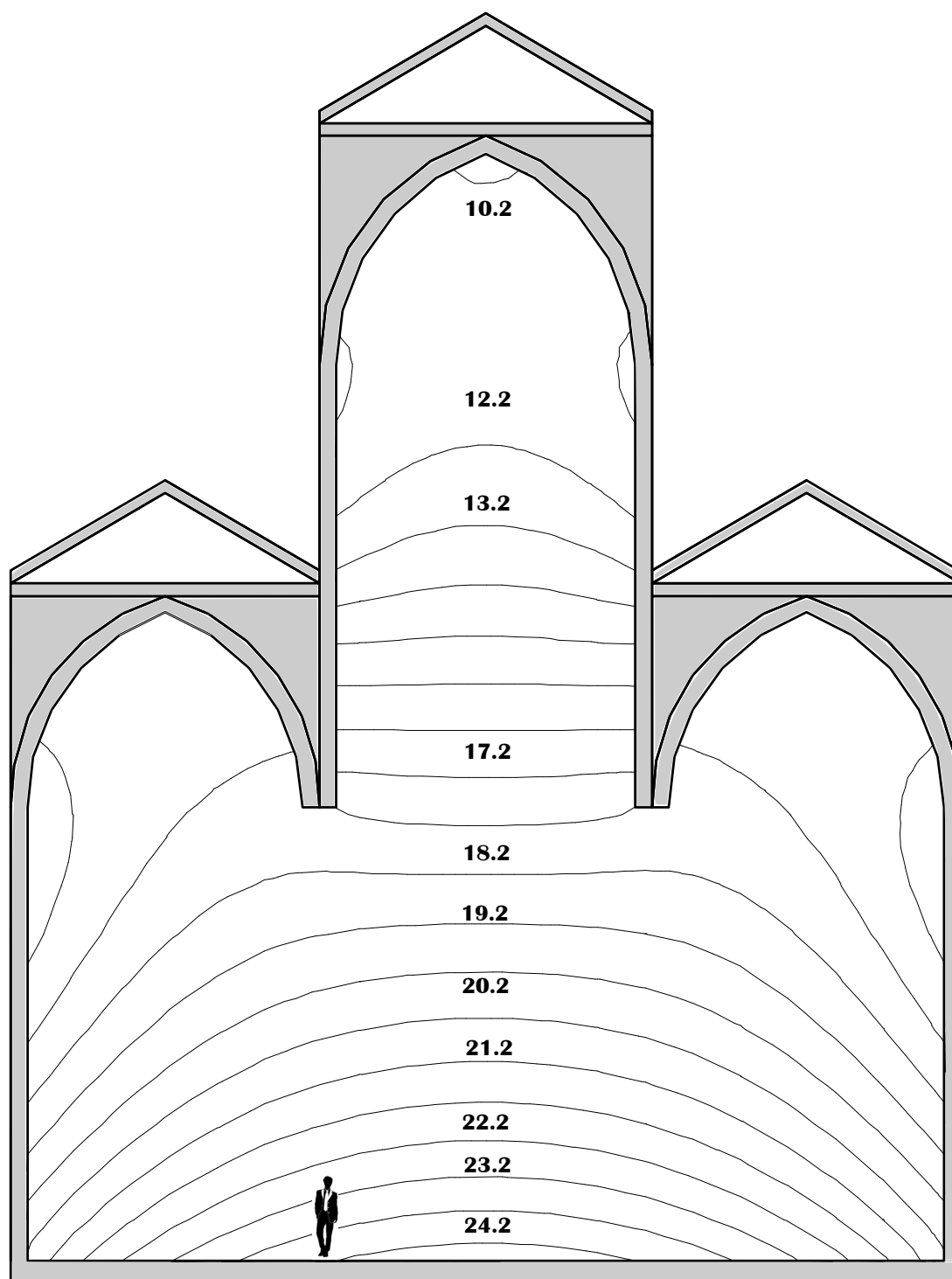


Figura 50: Distribución de temperaturas en el interior de la Catedral

11.2 Perfil de temperaturas en los cerramientos (*Abaqus CAE*)

En esta memoria se obvia mencionar el proceso de construcción del modelo para su simulación por elementos finitos, únicamente se menciona que tras importar el archivo con la sección de estudio dibujada, se definen los parámetros que representan cada sección, contornos, materiales y propiedades, a continuación se incorporan las condiciones iniciales y de contorno del problema y se simula. El paso a paso de este proceso de cálculo se explica en el apartado A9.3 del *Anexo 9*.

No tiene sentido un análisis cuantitativo profundo porque ese no es el fin de esta simulación, sino mostrar cómo evoluciona el campo de temperaturas para unas condiciones exteriores e interiores (corresponden con las instalaciones propuestas) y el flujo de calor a través de los cerramientos y cubiertas. Por tanto, los resultados cualitativos del análisis son los siguientes.

En el estudio, primeramente, se realiza un análisis global al campo de temperaturas suponiendo que en el exterior habrá 5°C, 10°C y 15°C. En la Figura 51 se muestra una representación de este perfil de temperaturas cuando en el exterior hay 5°C. (se elige 5°C como representativo porque tanto los detalles, como el posterior análisis del flujo de calor se hacen a esta temperatura, las imágenes que muestran el perfil de temperaturas para el resto de condiciones exteriores se documentan en el apartado A9.4 del *Anexo 9*).

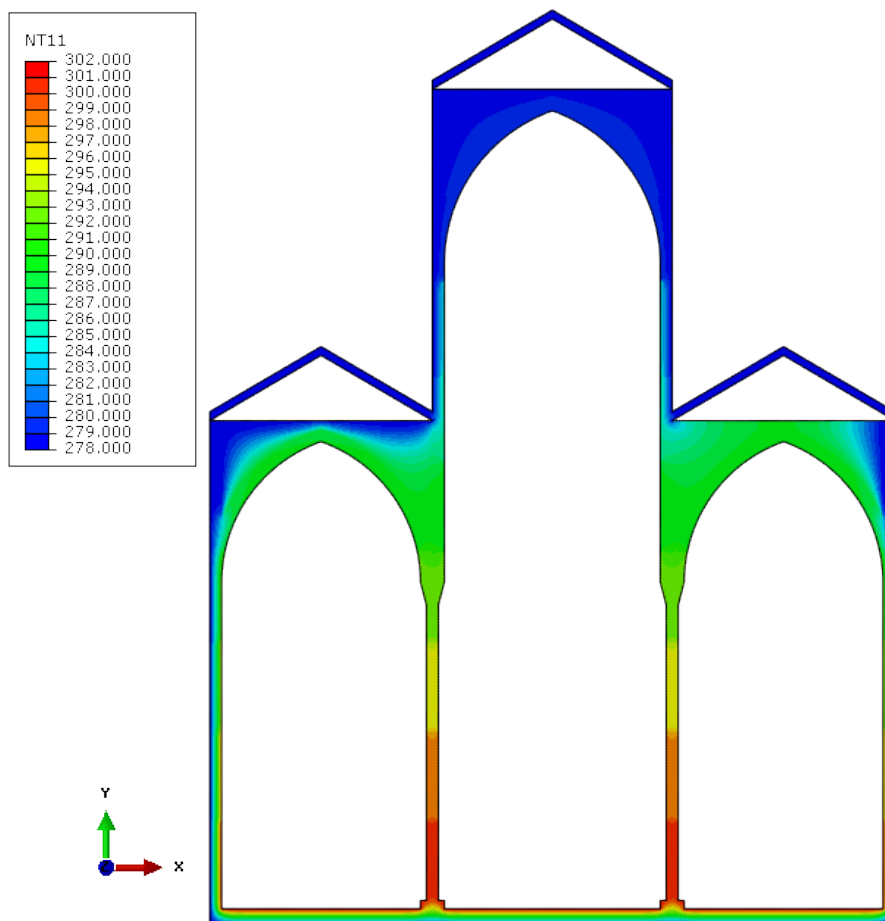


Figura 51: Perfil de temperaturas en la sección

Como se observa, la zona del suelo se encuentra a una temperatura de 29°C gracias a la instalación de suelo radiante y radiadores propuesta. Al tener una densidad el aire caliente menor a la del aire frío, éste asciende, calentando las paredes hasta que llega a las cubiertas de la nave central y de las laterales. Ahí se puede ver una región, correspondiente a la piedra caliza, a la arlita y a la cámara de aire que mantiene una temperatura uniforme de 17°C antes de que esta descienda por debajo, incluso, de los 5°C.

En la Figura 52 muestra el detalle del perfil de temperaturas en la conjunción de la columna y la solera de la Catedral. El perfil de temperaturas tiende a una forma parabólica su ascenso a través del pilar. Y la región de color verde muestra un campo de temperaturas uniforme antes de atravesar todo el forjado inferior.

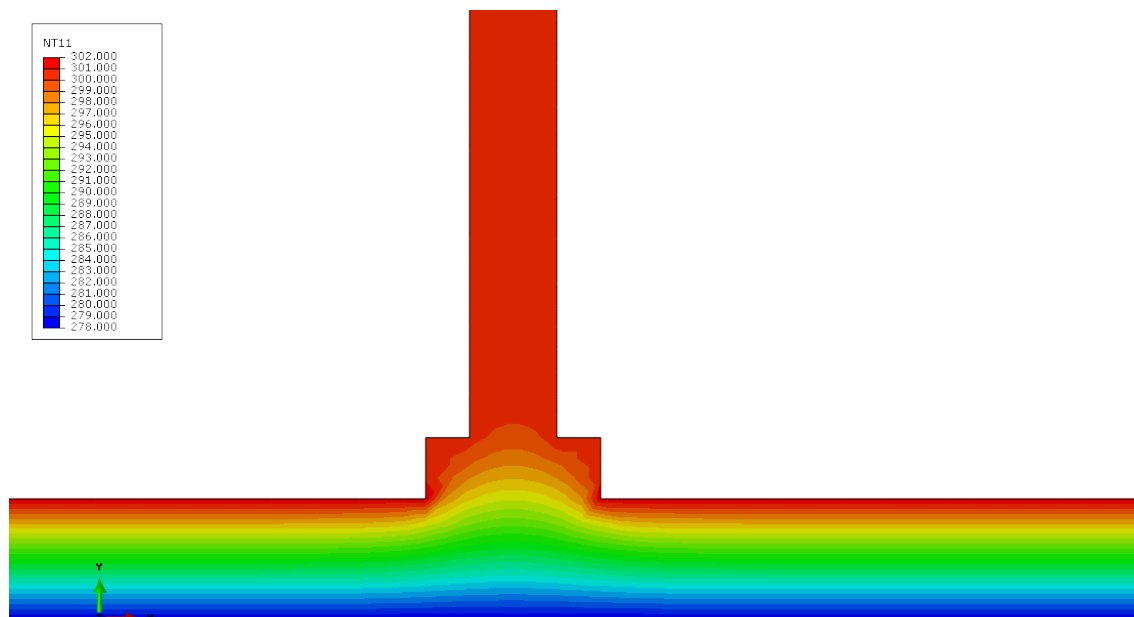


Figura 52: Perfil de temperaturas en la conjunción columna-suelo

Se afirma que, una vez que se han estabilizado las temperaturas (análisis estacionario) en las zonas bajas de la Catedral se consigue una temperatura en torno a los 22°C. En las cubiertas funciona el aislante térmico de arlita y cámara de aire ya que mantiene la temperatura antes de descender drásticamente una vez llegado al tejado.

A continuación se comentan las pérdidas que se experimentan en el modelo implementado con las direcciones principales de los flujos de calor. Los flujos de calor que se obtienen aparecen, de forma global en la Figura 53. Como se observa son máximos en los cerramientos laterales de las cubiertas de las naves bajas que tienen contacto con el exterior. Sin embargo, en la cubierta de la nave central la transferencia de calor no es muy elevada, en comparación con los de las naves laterales debido a que la temperatura en esa zona está más próxima a la del ambiente. Antes de ascender, el calor se pierde en la cubierta de las naves laterales.

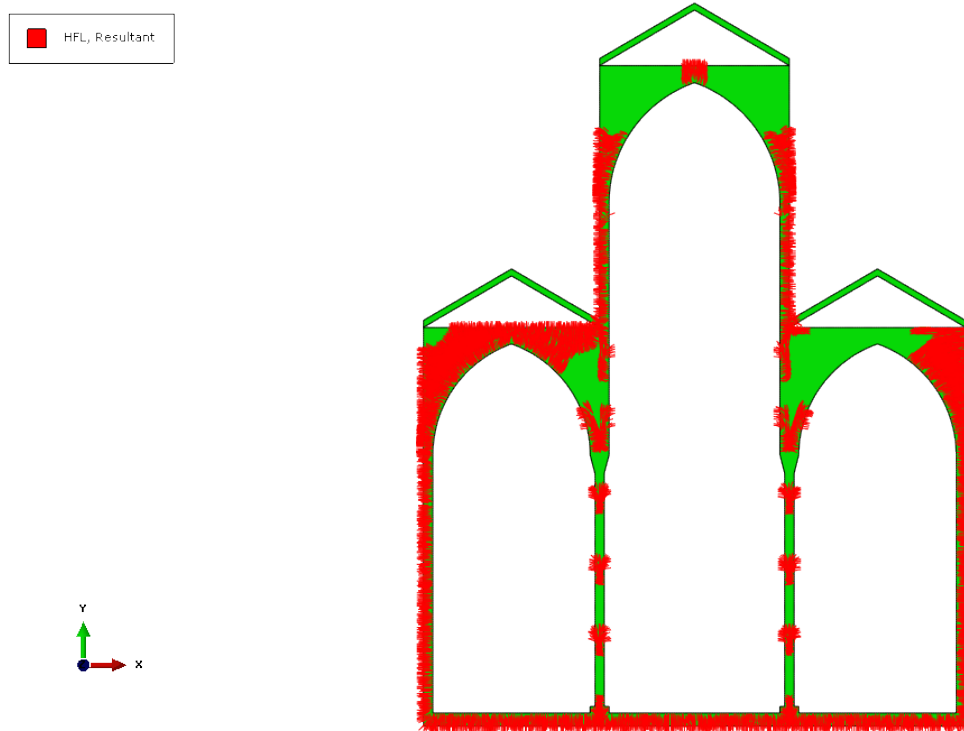


Figura 53: Flujo de calor en la sección transversal

En la Figura 54 se muestra un detalle de cómo se transfiere el calor en las cubiertas de las naves laterales. Se puede observar que la cámara de aire (se considera condiciones adiabáticas en la simulación, ya que la conductividad a través de esta es baja en comparación con la de la piedra caliza, teja y arlita), que cubre la luz de las naves laterales, supone apenas pérdidas de calor a través de ella, lo que provoca una distribución del flujo de calor a través de la arlita (que también es aislante) y de la piedra caliza.

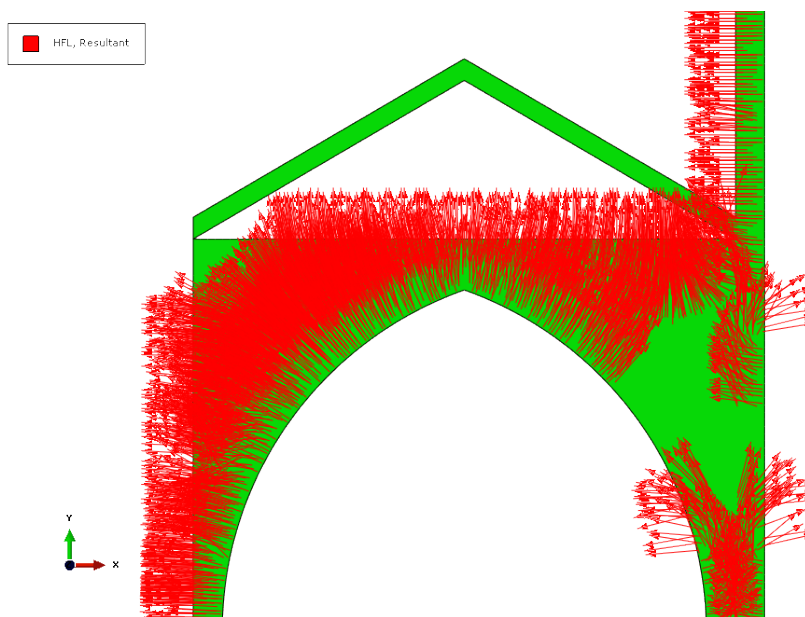


Figura 54: Flujo de calor en la cubierta de las naves laterales

Al observar las imágenes, el lector puede darse cuenta que las direcciones principales de la transferencia de calor son horizontales, mientras que la dirección que presenta mayores cambios en el perfil de temperaturas es la vertical.

Un desarrollo de todas las imágenes relacionadas con el perfil de temperaturas y fenómenos de transferencia de calor se documentan en el Anexo 9, citado anteriormente.

12. Conclusiones

La catedral se encuentra en el punto más alto del centro histórico de León, está dispuesta a 916 metros sobre el nivel del mar, y pertenece a la zona climática E1.

Como era de prever, las pérdidas a través de los cerramientos de la Catedral son muy elevadas, más de 1.100kW de pérdidas. Esto es debido, principalmente a que la fábrica cuenta con grandes vidrieras, (cerca de 1900 m²) características del estilo Gótico.

Los muros de la Catedral son de piedra caliza (componente mayoritario en su composición). Se encuentran a lo largo de la estructura 3 tipos de piedra diferente: Boñar, piedra del país y Hontoria. Si no se conoce la Catedral de León, y leyendo las dimensiones de la misma, uno se imagina que los muros que soportan la estructura van a ser muy anchos, pero realmente no es así, ya que el papel de resistir los esfuerzos de la catedral recae sobre los arbotantes. Gracias a estos elementos del gótico, la Catedral es muy ligera y los muros sirven para portar las grandes vidrieras dotando a la fábrica de luz y esbeltez.

Los grandes ventanales y los muros estrechos hacen que el espacio interior pierda mucho calor.

Se calculan los coeficientes globales de calor de los muros, vidrieras restauradas y no restauradas, de las cubiertas y de la solera.

Una vez que se obtienen las pérdidas de calor, se proponen dos instalaciones para hacerlas frente:

La primera, de baja temperatura que hace referencia a suelo radiante clásico y a una instalación de radiadores de baja temperatura situados en los bancos. Se eligen tres grupos generadores de calor de condensación que utilizan como combustible gas natural de 375kW con un rendimiento superior al 100%, gracias a que las calderas de condensación aprovechan el calor latente que se desprende al condensarse el agua.

El suelo radiante abarca toda la superficie del suelo de la catedral dividiéndose en 5 zonas –girola, altar mayor, crucero, coro y trascoro-. Tres de ellas, a su vez, se dividen otras 3 zonas, como se ha podido observar a lo largo del proyecto. La instalación de suelo radiante hará frente a 677 kW, serán necesarios más de 106 km de tubo de poliestireno que recorrerán los 343 circuitos. Como cada circuito se divide a su vez en otros circuitos de colectores se instala un caudal de distribución de 13 entradas y 13 salidas (12 de ellas corresponden con el suelo radiante, como se puede ver en los planos adjuntos al proyecto y a través de toda la memoria).

La instalación de radiadores en los bancos se propone su instalación en las dependencias del altar mayor, crucero y capillas de santa Teresa y de la Virgen del Carmen. Se divide en 4 bloques que tendrán, cada uno de ellos las mismas pérdidas de carga, pues, de esta forma se facilita mucho el equilibrado de la instalación. Otra de las características que se ha tenido en cuenta es que no vale cualquier radiador, pues esta limitado tanto por altura como por anchura. Por ello se eligen unos especiales del Fabricante Zehnder que cubren las bancadas, tal y como se ha ido

desarrollando en el Capítulo 8, en su mayoría. Además, se adjunta al proyecto el diseño del banco que podría instalarse, optándose por un modelo similar al que se instaló en la Basílica de san Isidoro, en la misma capital, pero con un color más oscuro.

La segunda, de alta temperatura, con su caldera correspondiente de biomasa para hacer frente a la potencia térmica restante que no han podido compensar ni el suelo radiante ni la instalación de los radiadores. Se propone la instalación de unos radiadores que están a la misma altura de la solera de la Catedral y que si se mira al frente quedan totalmente disimulados. Son el modelo "Terraline" del fabricante, antes mencionado.

Los grupos generadores de calor, vasos de expansión, chimenea, grupos auxiliares que ayudan al funcionamiento, se instalan en el cuarto de calderas del sistema de calefacción antigua. Se ha planteado en el capítulo 8, sección 3.3, la distribución en planta de estos elementos en el cuarto de calderas, cumpliendo la normativa vigente sobre el tema. Además se incorpora el dimensionado de la chimenea para evacuar los gases de la combustión.

Se proponen dos modelos de bombas en ambas instalaciones, según el criterio económico y según criterio de ruido. Este último, a mí juicio, es importante porque, al estar en un templo dedicado al culto debe permanecer lo más en silencio posible.

Finalmente se realiza un presupuesto de ambas instalaciones, obteniendo un montante final de, aproximadamente, 11 millones de euros.

Con el modelo de calefacción propuesto se consigue que las condiciones interiores de las naves estén a 20°C y a una humedad relativa del 50%. Estas no afectarán ni a los materiales interiores, ni a los muros, ni a los frescos que están distribuidos en el interior del templo, ni las esculturas de alabastro, ni a las rejerías de hierro fundido, ni a las vidrieras.

Las tres instalaciones del proyecto son importantes ya que si no se dispone de una de ellas será imposible compensar la totalidad de las pérdidas de carga. Hay que entender que la Catedral en su nave central son 30 metros de altura, y el volumen de aire es enorme. Un estudio más profundo acerca de la evolución del calor, se propondría ver qué temperatura se alcanza a los 1,80 metros de altura con la instalación de suelo radiante. No se compensarían todas las pérdidas pero, considerando que la Catedral no es un lugar de estancia permanente y que las personas irán provisto de ropa de abrigo en los meses de invierno, por lo que una temperatura de 20°C a esa altura daría una sensación de confort para el público asistente agradable. Se sigue el principio de "calentar a las personas y no las paredes". Además se demuestra, con un análisis cualitativo en los programas *Therm* y *Abaqus CAE*, de que la temperatura que siente una persona de 1,80 metros de altura son 23°C..

Se desestima utilizar toberas de aire, que inyecten aire caliente al ambiente desde el suelo, porque eso implicaría un análisis psicométrico muy desarrollado, así como estudiar la composición del aire húmedo y comprobar que en las zonas altas, a partir del triforio, no se produce condensación. Esta formación de pequeñas gotas de agua sobre la superficie vidriada y sobre la piedra caliza provocan oxidación, corrosión y podría llegar a estropear toda la labor actual de

restauración. Para evitarla se instalarían varios deshumidificadores que con la instalación de suelo radiante no sería necesario colocar.

La instalación de toberas de aire es propio de los sistemas de climatización, es decir, inyectar aire caliente en invierno y aire frío en verano. Dado que la temperatura de la Catedral en verano no es muy elevada (sobre 20°C), comprobado y testado por el autor, se elimina la posibilidad de instalar sistemas de climatización, centrando los esfuerzos en la instalación de calefacción.

Otra de las vías de desarrollo de este proyecto es utilizar los tejados del claustro del Palacio Episcopal, situado en frente de la portada sur de la Catedral, para instalar colectores solares que ayuden a la caldera de biomasa a calentar el agua. Se plantea el cálculo del f-chart para evaluar la cobertura solar que se consigue cubriendo un 25 %, aproximadamente, de la demanda de agua caliente para suelo radiante. El estudio se desarrolla para tubos con cubierta plana y tubos de vacío, llegándose a la conclusión de que es mejor instalar colectores de vacío ya que cubren un porcentaje mayor de la demanda de agua, un 28%.

Un proyecto que se puede abordar después de éste, es la incorporación de la capilla de la Virgen del Camino al cálculo de la calefacción, ya que esta dependencia se usa para el culto diario y utiliza una calefacción con caldera de gasóleo. La propuesta es quitar esta caldera, realizar el mismo estudio en ese espacio, y aprovechar el mismo grupo generador de calor. En este proyecto sí cabe la posibilidad de hacer un análisis de sensibilidad, pues se disponen de los datos de consumo de combustible y se pueden comparar ambos sistemas.

13. Bibliografía

Se recogen las referencias bibliográficas que se han utilizado para la elaboración del proyecto que incluyen libros, artículos, páginas web y catálogos de los fabricantes:

- [1]GÓMEZ RASCÓN, Máximo: *La Catedral de León. Cristal y Fe*; Ed.: Edilera, Septiembre 1991.
- [2]AA.VV: *La Catedral de León*; Edilesa; Diario de León.
- [3]WILLIS, Robert: *La construcción de las bóvedas en la Edad Media*; Instituto Juan de Herra. Escuela Técnica Superior.
- [4]WATSON, Percy: *La construcción de las catedrales medievales*; Ed.: Cambridge University Press, 2006.
- [5]AA.VV: *Conservación de Vidrieras Históricas. Análisis y diagnóstico de su deterioro. Restauración*; The Getty Conservation Institute.
- [6]MARGARIDA, Manuel: *Aislamiento Térmico*; Ed.: Técnicos Asociados, S.A.; Barcelona, 1984.
- [7]AA.VV: *Norma Básica de la Edificación CT-79: Condiciones Térmicas de los edificios*; Ed.: Centro de publicaciones de Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente; Madrid 1996.
- [8]AA.VV: *La Piedra Natural en Castilla y León*. Ed.: Junta de Castilla y León, 2008.
- [9]CASATI CALZADA, M.J. y GÁLVEZ RUIZ, J.C.: *Influencia de las propiedades de la fábrica de la Catedral de León en su comportamiento estructural*; Artículo publicado en la web, 2009.
- [10]SÁNCHEZ SÁNCHEZ, Narciso: *Geometría de los arcos. Guía para la construcción y trazado de arcos*; Ed.: Región de Murcia, Julio 2011.
- [11]AA.VV: *Therm 5.2/Window 5.2, NFRC Simulation Manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Julio 2006.
- [12]MARÍN, José María; MONNÉ Carlos y UCHE, Javier: *Transferencia de Calor*; Universidad de Zaragoza; Febrero 2007.
- [13]MONNÉ BAILO, Carlos y DíEZ PINILLA, Luis Ignacio: *Prácticas de energías renovables*; Prensas Universitarias de Zaragoza; 2007.
- [14]PIANZO OJER, José Manuel; SOTO FRANCÉS, Victor y GARCIA LASTRA, Arcadio: *DTIE 7.05 Cálculo de cargas Térmicas*, Ed.: Atecyr.
- [15]*Manual Suelo Radiante Clásico Polytherm*.
- [16]Página web: www.lasvidrieras.com
- [17]Página web: <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
- [18]AA.VV: *Un Ambiente cálido en el interior de la Iglesia*.
- [19]AA.VV: *Materiales para Revestimiento: La piedra natural*.

- [20] Catálogo de calderas de la empresa L.Solé. SA.
- [21] Catálogo BAXI Roca
- [23] Catálogo de bombas Sedical
- [24] GALDÓN, Francisco: *Comentarios al Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*, Ed: ONAIF.
- [25] Catálogo y programa de cálculo DINAK para el dimensionamiento de chimeneas
- [26] *Manual web del programa Abaqus CAE*
(<http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11/books/usi/default.htm>)

