

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- OBJETIVOS DEL TRABAJO

Este Trabajo de Fin de **Máster en Ingeniería Acústica y Vibraciones**, tiene el propósito de profundizar en los conocimientos adquiridos durante el curso en las diferentes asignaturas impartidas por la UVA y la ULE, y aplicar al estudio del comportamiento acústico de la “SANTA IGLESIA CATEDRAL DE NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN, DE VALLADOLID”.

El motivo de la elección de este monumento de Valladolid es la facilidad de acceso a los datos existentes, ser la primera iglesia del Arzobispado de Valladolid, no existir ningún estudio específico de la acústica de este monumento y haber redactado con anterioridad un “Manual de Mantenimiento” de la catedral.



Figura 1.1. Fachada principal 2012

Para la caracterización del comportamiento del campo sonoro, analizaremos la evolución temporal de las relaciones energéticas existentes entre el sonido reflejado y el sonido directo en los distintos puntos de la sala. Los datos acústicos objetivos y subjetivos que vamos a calcular, estudiar y valorar se van a obtener con el programa de simulación acústica CATT (*computer Arded Theatre Technique*). Para su obtención se necesita un modelo informático en

3D del medio a estudiar para que el programa pueda aplicar sus algoritmos, primer paso del proceso y segundo objetivo principal.

En el próximo capítulo, El Monumento, estudiaremos brevemente su historia con más detalle. En este apartado únicamente comentar que de todo el complejo catedralicio nos vamos a centrar en la “Cuarta Colegiata o Catedral Herreriana”

En un templo como la inconclusa catedral de Valladolid pueden realizarse actividades muy variadas. La actividad principal de una catedral es el culto y como primera iglesia de la Archidiócesis, todas las celebraciones importantes del Arzobispo se celebran en ella. En consecuencia lo que prima en este tipo de actos es la inteligibilidad de la palabra. Por otro lado, el magnifico espacio disponible permite que se utilice para otro tipo de actividades distintas a las del culto, principalmente conciertos y exposiciones. Recordemos que en su día fue sede de la primera exposición de las Edades del Hombre y que periódicamente se realizan conciertos de órgano, entre otros usos posibles, es por lo que este estudio acústico se va a centrar en el comportamiento de la seo a la música.



Figura 1.2 Carteles anunciadores conciertos 2012.

En la actualidad la catedral dispone de dos órganos, uno romántico de Aquilino Amezua y C^{ia}, ubicado en el coro nuevo, encima del acceso principal, que tomaremos como referencia y desde diciembre de 2005, otro electrónico de la

marca ALLEN¹, que no vamos a considerar en este trabajo, puesto que nos centraremos en el comportamiento acústico del espacio catedralicio sin considerar la electroacústica instalada, necesaria para el órgano ALLEN y la buena inteligibilidad de la palabra en toda la audiencia.

La relación entre el mundo de la acústica de salas y el de la restauración arquitectónica no es muy habitual, a nivel práctico más bien inexistente, a pesar de que en los proyectos de restauración ordinarios que cada día son más multidisciplinares, para cualquier intervención en un monumento previa a la elaboración de un proyecto, es necesaria la realización de múltiples estudios, (arqueológicos, históricos, biológicos, petrológicos, etc.) que aporten los datos necesarios para tomar las decisiones correctas durante la redacción del proyecto y la ejecución de los trabajos. En este caso, lo que se pretende es conocer los parámetros acústicos de la seo de Valladolid, parámetros no habituales de un BIC², en el convencimiento de que cuantos más datos se conozcan de un monumento, más acertado y respetuoso será su mantenimiento y restauración.

Recordar que en la E. T. S. de Arquitectura de la UVA se ha impartido el Máster en Restauración Arquitectónica más antiguo de España, desde 1989. Máster cursado con anterioridad al de Ingeniería Acústica y Vibraciones.

Otro de los motivos de la elección de este tema es que desde 1998 estoy trabajando en el Servicio Territorial de Cultura de Valladolid como Aparejador Territorial. En consecuencia, me ha tocado realizar el control y el seguimiento de las últimas intervenciones que se han realizado en la catedral, promovidas por la D. G. de Patrimonio de la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Castilla y León, lo que me ha permitido el acceso a una amplia documentación y realizar numerosas visitas. Entre la documentación arquitectónica del monumento consultada se puede destacar: el Libro de Fabrica de la catedral, un informe de Ventura Rodríguez de 1768. Un estudio de Fernando Chueca Goitia de 1947, un Plan Director en dos fases, 1995 y 1996, varios proyectos completos y ejecutados, redactados por el arquitecto del Arzobispado, Elesio Gatón Gómez, y un levantamiento topográfico incluido en la documentación de la 1ª Fase del Plan Director, documentación que

¹.- Órgano con 19.000 tubos digitalizados (sonido grabado), cuatro teclados más pedalier y 316 registros. Este órgano electrónico dispone de 26 pantallas acústicas o altavoces, ubicadas en los balcones de las naves menores, encima del acceso a las capillas laterales.

².- Acrónimo por el que se conoce a los monumentos. Bien de Interés Cultural.

estudia y describe exhaustiva y detalladamente el monumento. No ocurre lo mismo que con la documentación acústica específica de la catedral, de la que apenas se ha localizado un artículo de Joaquina Labajo Vades.

En relación a las fuentes se ha consultado el Archivo Catedralicio, el archivo de la Unidad Técnica, del Servicio Territorial de Cultura de la Junta de Castilla y León, el Archivo Provincial, el Archivo Municipal, la Hemeroteca del Norte de Castilla, diversas bibliotecas de la localidad, las ponencias y comunicaciones relacionadas con el tema de ISVA (*internacional Seminar on Virtual Acoustics*) y Tecn.-Acústica, así como la obligada consulta a Internet. Los documentos más significativos consultados para realizar esta memoria se relaciona en la bibliografía.

1.2.- INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA GRAFICA

INTRODUCCIÓN HISTORICA

La primera noticia histórica sobre estudios del sonido, la encontramos en la antigua Grecia. Pitágoras (580 a. C. – ca. 495 a. C.) y Aristóteles (384 a. C. – 322 a. C.) se preocuparon de estudiar y explicar el comportamiento del sonido. En el siglo I a. C., Marco Lucio Vitruvio Polión, estudio el comportamiento acústico de los teatros, cuyas conclusiones las expuso en el capítulo octavo de su quinto libro, clasificando los lugares en disonantes, circunsonantes, resonantes y consonantes³ (Vitruvio).

En nuestra era, parte de los científicos más conocidos han continuado con el estudio de la acústica, teniendo en cuenta que el desarrollo de las herramientas matemáticas son básicas, como: Galileo Galilei, (1.564 – 1.642) que estudio la relación entre la frecuencia, la tensión, el diámetro y la densidad en una primera aproximación a la ley de cuerdas, demostrando la relación entre la frecuencia y los intervalos musicales. Creador de un nexo de unión entre las matemáticas y la mecánica.

También el filósofo, teólogo y matemático, francés, Mersenne, M. (1.588 – 1.648) estudio la teoría musical, autor de "*Traite de l'harmonie universelle*"

³.-Disonancia equivale a lo que hoy denominamos INTERFERENCIA; circunsonancia es lo que entendemos por, REVERBERACIÓN; resonancia equivale a ECO y consonancia es el proceso por el cual un sonido se fortalece por efecto de la REFLEXIÓN.

1627, entre otras materias, aunque es más conocido por los números primos de Mersenne.

Saveur, J. Matemático y físico francés, considerado el creador de la acústica musical, estableció los fundamentos de la armonía mediante relaciones numéricas (1.653 – 1.716).

Fourier, J. (1.768 – 1.830) matemático francés que desarrollo la Transformada de Fourier, de esta manera, extendió el concepto de función e introdujo una nueva rama dentro de la teoría de las ecuaciones diferenciales.

Helmholth, H. (1.821 – 1.894) que construyó un aparato para analizar las combinaciones de tonos el “resonador de Helmholtz”.

El físico inglés Lord Rayleig, (1.842 - 1919) publico en 1.887, *Theory of Sound*, con fundamentos teóricos que todavía tenemos de referencia y donde describe un nuevo procedimiento para medir las vibraciones.

El estudio de la acústica arquitectónica da un paso importante cuando en 1.895 el rector de la Universidad de Harvard⁴ encarga al físico Wallace Clement Sabine (1.868 – 1.919), considerado el padre de la acústica de salas, el acondicionamiento acústico de la sala “*Fogg Lecture Hall*”, del “*Fogg Art Museum*”. Sabine, W., fue capaz de demostrar que existen unos vínculos relacionados entre la calidad acústica, el tamaño de la sala, y la superficie de absorción, definiendo el tiempo de reverberación, parámetro que sigue siendo el más importante y utilizado a la hora de caracterizar la calidad acústica de una sala, calculándolo a partir de la curva de decaimiento energético, medido en un punto de la sala.

$$T = 0,161 \frac{V}{A_{equiv.}} \text{ (en segundos)}$$

donde:

V = volumen del recinto en m^3

$A_{equiv.}$ = absorción total del recinto.

⁴.- Universidad privada, fundada en 1636, ubicada en Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos.

Esta fórmula en ocasiones da tiempos de reverberación distintos a los reales, debido a su simplicidad, puesto que considera que la energía se pierde gradualmente y de forma proporcional al conjunto de energía que queda en la sala. Este desfase es más evidente en salas muy absorbentes, no obstante es la más aceptada y de referencia a nivel internacional, por sus resultados y sencillez, puesto que con un solo parámetro representa todas las cualidades acústicas de una sala.

- Formula de C. F. Eyring (1901-1981) ajusto la fórmula de Sabine, W. para salas más absorbentes, obteniendo valores más ajustados a la realidad y confirmando los valores de Sabine, W. en salas con absorciones pequeñas,

$$T_R = \frac{0,162V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \text{ (en segundos)}$$

donde:

V = volumen del recinto en m³. S = Superficie total del recinto en m²

Suponiendo todas las superficies tienen el mismo coeficiente de absorción $\bar{\alpha}$

En casos de campo abierto $\bar{\alpha} = 1$, obteniendo un $T_R = \text{cero}$.

En el caso de que tengamos materiales de alta absorción las fórmulas anteriores pueden dar coeficientes de absorción superiores a la unidad, cosa que es imposible. Por eso, otros científicos han estudiado y publicado su fórmula, algunas de las cuales recogemos en el anexo 1, definiciones.

Para obtener el valor del tiempo de reverberación (RT) representativo de una sala, a cada frecuencia de trabajo, tenemos que promediar los valores medidos en los diferentes puntos.

TEORIAS DE LA ACÚSTICA GRAFICA.

En el trabajo que nos ocupa, entendemos la acústica de salas, como el estudio del comportamiento acústico de los espacios arquitectónicos (Auditorios, iglesias, salas, locales, etc.) ante la energía producida por una fuente. Los principales fenómenos acústicos que condicionan una sala son: la reflexión, (especular y difusa) la difracción y la absorción.

La acústica de salas se puede enfocar desde tres teorías distintas, dependiendo del estudio se utilizará una u otra o una combinación: La acústica geométrica, la acústica ondulatoria y la acústica estadística.

.- La acústica geométrica esta basada en la hipótesis de reflexiones especulares, es la utilizada en los programas de simulación e imprescindible en cualquier estudio acústico, puesto que nos permite conocer la posibilidad de la existencia de ecos y focalizaciones. Esta teoría estudia la distribución del campo acústico mediante el trazado de rayos, que surgen de la fuente en la dirección de propagación de las ondas sonoras, aplicando las leyes o ecuaciones de la óptica geométrica, que simplifican las ecuaciones: a) Propagación rectilínea o principio de Fermat⁵, b) cumple las leyes de la reflexión especular: Ley de Snell, y Ley de Lambert, c) ley de la refracción, que cambia de dirección al cambiar de medio.

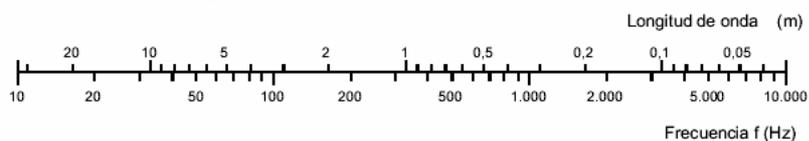
Las hipótesis iniciales de esta teoría, son las siguientes: a) el medio es homogéneo e isótropo, b) no se aprecian fenómenos de difracción, aunque esto depende de la longitud de onda y de la sala, c) consideramos las superficies lisas, d) se suman las intensidades de las ondas coincidentes en un punto, por considerar que todas tienen la misma fase.

Los requisitos que se precisan para que se produzca una reflexión marcadamente especular son los que tenemos en nuestra sala: dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido⁶ y una superficie lisa y muy reflectante o poco absorbente. (Carrión, 1998)

El límite de la acústica geométrica, se produce cuando la energía de la sala se ha estabilizado entre la emisión y la absorción, es el comienzo del estudio de la energía acústica en su conjunto.

⁵.- Pierre de Fermat, (1601-1665) Jurista y matemático francés, descubrió el cálculo diferencial. El principio de Fermat: El trayecto seguido por la onda sonora al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es mínimo.

⁶.- Relación entre la longitud de onda en metros y frecuencia en Hz, en el aire.



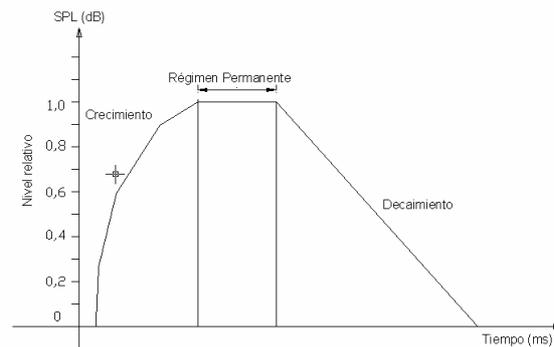


Figura 1.3 Evolución teórica de la presión (Carrión, 1998)

.- Acústica estadística, a diferencia de la geométrica que estudia el comportamiento de cada rayo individualmente, estudia la energía de una sala en su conjunto.

.- Acústica ondulatoria, esta teoría se basa en la resolución de la ecuación diferencial de la onda acústica en cada sala, partiendo del estudio de las condiciones específicas de contorno y teniendo en cuenta el debilitamiento energético de cada una de las ondas. La ecuación se puede complicar mucho dependiendo de la sala, por lo que esta se utiliza como base teórica para la resolución de problemas concretos. (Carrión, 1998)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA GRAFICA

En este apartado haremos un repaso de los principios acústicos más significativos que vamos a tener en cuenta o manejar en este trabajo, dejando las definiciones de los mismos para el anexo 1.

.- Reflectores curvos. Todos los techos de las distintas naves de la catedral están resueltos con bóvedas de piedra caliza rematadas en yeso. En la nave principal se soluciona con una bóveda de cañón de 26 pies de radio (7,24 m.), arrancando a 86 pies del suelo (23,96 m). Las bóvedas de crucería de las naves laterales tienen un radio de 16 pies (4,46 m) comenzando su traza a 47 pies (13,09 m) y las de las capillas hornacinas con bóveda de cañón de 11 pies (3,06 m) arrancan a 22 pies (6,13 m), como podemos observar en la sección transversal (Figura 1.4).

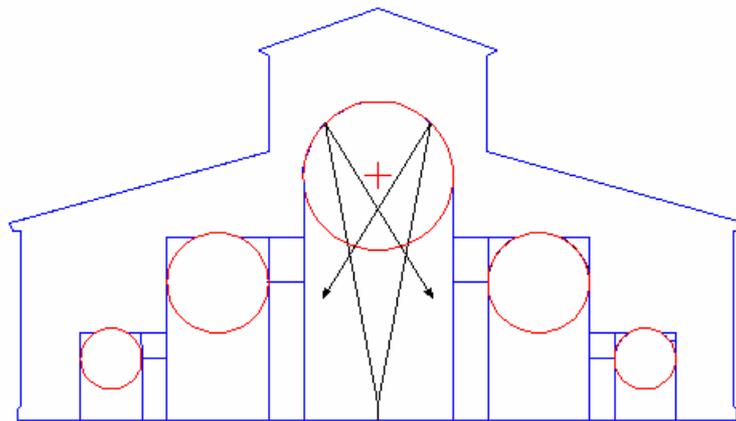


Figura 1.4 Esquema de la sección transversal de la catedral.

Al estudiar las focalizaciones en las superficies cóncavas de estas bóvedas, comprobamos que en todos los supuestos de nuestra simulación, nave central, nave lateral y capillas hornacinas, tanto la fuente como los receptores están fuera del perímetro de la esfera creada a partir de la prolongación de la superficie de las bóvedas, ($R > 2H$) con lo que estas producen una dispersión del sonido repartiéndose por igual. En el caso contrario ($R < 2H$) se produce una focalización indeseada.

.- Ecos y primeras reflexiones. Las primeras reflexiones deben reforzar el sonido de los espectadores más alejados de la fuente, tanto las del techo como las de las paredes. Cuando estudiamos la inteligibilidad de la palabra estas contribuyen a su mejora y a la comprensión del mensaje, reforzando el sonido directo, siempre que se encuentren dentro de los primeros 50 ms. Si el retraso es superior a 50 ms, en el mensaje oral y 80 ms, en la música se produce un efecto negativo al que se denomina eco, percibiendo las dos señales de forma independiente.

En nuestro caso, dadas las dimensiones de la zona de audiencia (11,00 x 40,00 m del estado actual) debemos de comprobar en los ecogramas de los receptores repartidos por la sala, el nivel de presión sonora y el tiempo en ms que tardan en llegar las primeras reflexiones, para cada una de las frecuencias, teniendo en cuenta que podemos encontrarnos con 4 situaciones o zonas:

Zona A, donde las reflexiones llegan antes de los 50 - 80 ms.

Zona B, donde la reflexión llega antes de los primeros 50 - 80 ms, pero con un nivel relativo más elevado, no se produce eco pero la localización de la fuente se desplaza hacia la superficie que genera la reflexión.

Zona C, donde la reflexión llega después de los primeros 50 - 80 ms, pero no es perjudicial puesto que tiene un nivel suficientemente bajo.

Zona D, donde la reflexión llega después de los primeros 50-80 ms, con un nivel elevado y se percibe como un eco. (Carrión, 1998)

PARÁMETROS ACÚSTICOS

De todos los parámetros que podemos calcular con “Catt-Acoustic” vamos a centrarnos en los que nos van a servir para caracterizar el espacio acústico de la audiencia en la nave central y cabeceras de las laterales, dando preferencia a los que hacen referencia a los acontecimientos musicales y cuyos guarismos y graficas serán comentados en el capítulo 4, “Cálculos y análisis acústicos” y en el 5 “Conclusiones”.

Un evento sonoro cualquiera depende básicamente de dos características: volumen y tono, o lo que es lo mismo, la presión sonora y la frecuencia. Todos los parámetros acústicos objetivos y subjetivos a estudiar, van a ser variantes de estos.

- Espectro de frecuencias, lo primero que tenemos que definir son las frecuencias con las que vamos a trabajar. En esta ocasión el programa de simulación limita las opciones. De las 11 frecuencias centrales de banda de octava estandarizadas por la NORMA-ISO 266: 16. 31,5. 63. 125. 250. 500. 1000. 2000. 4000. 8000. y 16000 Hz. Las 6 bandas de octava cuyas frecuencias centrales van de 125 a 4000 Hz., son las que se van a considerar, puesto que cubren sobradamente todos los objetivos y necesidades planteados, siendo las más utilizadas por los investigadores de recintos de culto, tanto para el diseño como para el diagnóstico.

- El tiempo de reverberación, es el parámetro clásico que define la calidad acústica de una sala, pero simplifica excesivamente, como hemos comentado, es por lo que se hace necesario estudiar otros parámetros objetivos y subjetivos que caractericen la sala y maticen las cualidades del uso del

recinto. Estos pueden centrarse específicamente en la palabra como el RASTI y el STI, o la música como la calidez BR (*Bass Ratio*) y la nitidez o brillo, Br.

El programa nos facilita 5 tiempos de reverberación para cada frecuencia; el T-15, T-30, EDT, *EyrT*, *Eyrtg* y *SabT* en segundos.

.- Early Decay Time (EDT) este parámetro temporal se aplica y caracteriza cualquier tipo de recinto. Se calcula por el método de promedio de rayos, o por el de Schroeder, de forma análoga al cálculo del tiempo de reverberación, utilizando la pendiente correspondiente a la pérdida de los primeros 10 dB, de la curva de decaimiento energético, expresado en segundos.

.- Nivel de presión sonora (SLP) basado en la formula:

$$SPL = 20 \text{Log} \left(\frac{P_i}{P_r} \right) (dB)$$

donde:

P_i = Presión eficaz en el punto i, en N/m^2 .

P_r = P. de referencia correspondiente al umbral de audición; 2×10^{-5} Pa.

Este parámetro es de aplicación a cualquier tipo de recinto y es la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro.

En la actualidad y debido a los avances en las herramientas⁷ de medición de intensidades⁸ también se utiliza la siguiente formula:

$$L_i = 10 \text{Log} \left(\frac{I_i}{I_r} \right) (dB)$$

donde:

I_i = Intensidad en el punto i, en w/m^2 .

I_r = Intensidad de referencia; 10^{-12} w/m^2 .

⁷.- Sondas de intensidad, analizador, calibrador y software.

⁸.- Magnitud de carácter vectorial

.- Calidez acústica (BR) y brillo (Br) o vivacidad. El BR, representa la riqueza en bajas frecuencias (sonidos graves) de una sala, lo que es indicativo de la sensación subjetiva de calidez y suavidad de la música escuchada en ella. El Br, mide la riqueza en altas frecuencias (sonidos agudos) de la sala, lo que conduce a un sonido claro y brillante. Ambos parámetros se utilizan en recintos destinados exclusivamente a la música.

.- Sonoridad, se distinguen dos coeficientes de sonoridad distintos: *Speech sound level*. S, indica el grado de amplificación que produce un recinto sobre el mensaje oral emitido, utilizado en salas destinadas a la palabra. El recomendado para recintos orientados a la audición de música G, “strength factor” según Lehmann, se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora L_p producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m. Ambos niveles se miden por bandas de octava entre 125 Hz y 4Khz aplicando la misma potencia a la fuente sonora.

Beranek recomienda que el valor de G para la sala vacía, obtenido como promedio de los correspondientes a las bandas de octavas centradas entre 500 Hz y 1 KHz, este situado entre: $4 \leq G_{mid} \leq 5,5$ dB.

.- Relaciones energéticas, ELR. (*Early to Late Ratios*) Es de aplicación a cualquier tipo de recinto pero se emplea con más frecuencia en salas de conciertos. El programa muestra los valores C_{50} (claridad de la voz) y C_{80} (claridad musical) correspondientes a la banda de frecuencia seleccionada, permite la audición separada de sonidos y tonos entre 3 y 8 dB para asientos delanteros y entre 0 y 5 dB para asientos traseros.

$$C_{80} = 10 \text{Log} \left(\frac{E_{0-80}}{E_{80-\infty}} \right) (dB)$$

.- Definición, D (del alemán *Deutlichkeit*). Este parámetro es de aplicación exclusiva a salas destinadas a la palabra, y se define como la relación entre la

energía que llega al receptor durante los primeros 50 ms, y la energía total. Relaciona la inteligibilidad de la palabra y con la sonoridad.

.- Índices de voz: STI y RASTI. El STI, (*Speech Transmisión Index*) puede tomar valores entre 0, inteligibilidad nula y 1, óptima. Este parámetro es complejo de calcular, fue definido por Houtgast y Steeneken, y se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación de la voz (98 señales) debido a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala.

Rasti, (*Rapid Speech Transmisión Index*) es la simplificación del STI, reduciendo el tiempo de cálculo.

.- Tiempo central, (t_s) aplicado a cualquier tipo de recinto, según Kürer, es el momento de primer orden del área situada debajo de la curva de decaimiento energético. El t_s , sirve para medir el grado de nitidez del sonido, con lo que un aumento de t_s , indica un aumento de la nitidez percibida en la posición donde se ha calculado.

También se denomina centro de gravedad, puesto que mide el tiempo que transcurre desde el inicio hasta el centro de gravedad de la curva de decaimiento energético.

1.3.- ANTECEDENTES

Esta memoria acústica de un BIC, con la categoría de Monumento se va a centrar exclusivamente en la cuarta Colegiata o Catedral de Valladolid, como se ha comentado, de la que desconocemos todos los parámetros acústicos, objetivos y subjetivos. No obstante, hay otras iglesias, colegiatas y catedrales, de las que se han realizado estudios acústicos con objetivos similares y algunos con el mismo programa de simulación. La mayoría de los trabajos consultados han complementado con mediciones *in situ* los datos obtenidos en la simulación, o solamente analizado la medición. En esta ocasión no se han realizado mediciones *in situ*, y todos los resultados obtenidos y comentados son de la simulación virtual. Estos antecedentes nos sirven de orientación y referencia al presente trabajo.

En este apartado vamos comentar algunos de los artículos y trabajos relacionados con el conocimiento acústico de las iglesias y catedrales publicados recientemente, estudios que reflexionan sobre puntos concretos, que entendemos son interesantes para esta memoria. La mayoría de estos artículos son proyectos de investigación universitarios, destacando los de la Universidad Politécnica de Valencia, la Politécnica de Madrid y Universidad de Sevilla.

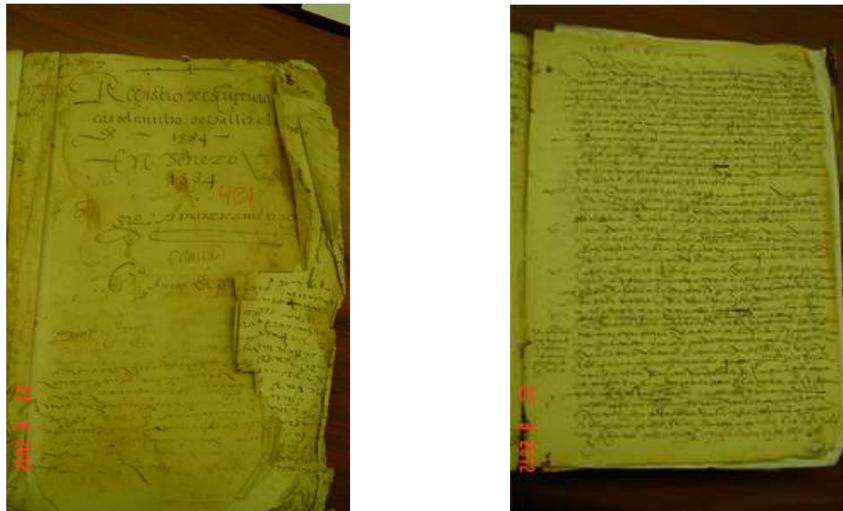


Figura 1.5. Protocolo 481, en folio 222, contrato de un mozo de coro.
 Archivo Histórico Provincial Valladolid⁹.

⁹.- “Cristóbal Rodríguez se obliga a trabajar 6 años como mozo de coro externo (sin vivir en la casa del maestro de capilla) de la iglesia colegiata de Valladolid por 6 años. 9 julio 1584”. P481, fol. 222. Parte de la transcripción

1º.- El primer trabajo que comentamos es de Juan José Sendra Salas y Jaime Navarro Casas, catedráticos de la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla. Su libro, “La evolución de las condiciones acústicas en las Iglesias: del Paleocristiano al Tardo Barroco” que hace un recorrido muy interesante por la historia de la acústica de las iglesias en general.

En el primer capítulo podemos encontrar conclusiones muy significativas y claras como:

“...en los espacios abovedados se produce el efecto de focalización sonora: concentraciones de sonido en determinados puntos en detrimento de otras zonas más sordas, cualidad esta poco apropiada para lograr unas buenas condiciones acústicas.”

Afirmación que matizan y relacionan con el diseño de la bóveda, pero en cualquier caso siguen prefiriendo, como no podía ser de otra manera, los techos bajos de madera de las primitivas iglesias a las bóvedas de piedra.

“Las experiencias realizadas por Gusttave Lyon dieron como resultado un tiempo de persistencia de la audición de, aproximadamente, 1/15 seg. si la fuente emite un impulso corto (sonido de palabra) y de 1/10 seg. si emite un sonido más prolongado (sonido musical). Ampliando estos conceptos a una sala, diremos que cuando una persona situada en ella, por la reflexión que se produce en sus paredes, suelo o techo, le llegan dos frentes de onda (sonido directo y sonido reflejado, por ejemplo) desfásados un intervalo de tiempo mayor que el tiempo de persistencia de la audición, percibirá eco y, en consecuencia, dos sonidos consecutivos; en caso contrario sentirá reverberación, o un único sonido prolongado”.

Refiriéndose a las iglesias góticas, en muchos casos superan estos límites a pesar de contar con algún elemento favorable en el diseño como las capillas hornacina o laterales.

“Positivo también, desde un punto de vista acústico, iba a resultar la costumbre de disponer capillas laterales, lo que se introdujo en algunas iglesias góticas del Medioevo e iba a tomar un gran protagonismo en el Renacimiento”.

del contrato de mozo de coro, que amablemente mi compañero Angel Laso (Director del Archivo Provincial) ha realizado.

El capítulo segundo está dedicado a las Iglesias Renacentistas y Tridentinas, en el que podemos encontrar el resto de las claves de la acústica del templo a estudiar. En él se repasan las plantas de varias iglesias¹⁰ y las condiciones acústicas de las cuatro grandes basílicas romanas¹¹, así como los cambios acústicos producidos por los diferentes estilos arquitectónicos, siendo significativos los siguientes párrafos.

“Desde el punto de vista acústico, el triunfo de la horizontalidad en estas dos iglesias¹², frente a la verticalidad ascendente del gótico y, en general unas proporciones más armoniosas, no podía si no tener un efecto beneficioso. Si a ello añadimos la presencia del techo plano (bajo) de madera artesonado (difusor para los sonidos, especialmente medios) de la nave central, en vez de las bóvedas de crucería (duras y localizadoras) de las naves góticas, y una rica ornamentación (también difusora, sobretodo para los sonidos agudos) en contraposición a las grandes superficies de paños desnudos (reflectantes especulares) podemos afirmar con rotundidad que la mejora de las condiciones acústicas interiores logradas con este tipo de iglesias, sobre sus antecesoras medievales, fue considerable”

“Efectos difusores de los sonidos agudos también tienen las pilastras de S. Andrea que, por primera vez, sustituyen a las columnas”.

Terminan su trabajo con un capítulo dedicado a la acústica de las iglesias Barrocas y Tardobarrocas.

2º.- Otro estudio al que queremos hacer referencia es el de Teofilo Zamarreño García, Sara Girón Borrero, Miguel Galindo del Pozo y Rafael Suárez Medina. “La acústica de las catedrales andaluzas: un proyecto I+D interdisciplinar para la recuperación del patrimonio cultural”, proyecto aprobado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523) con los siguientes Promotores u Observadores: ministerio de Cultura, Consejería de Cultura de la de Andalucía, Orquesta Barroca de Sevilla, y los cinco Cabildos Catedralicios.

¹⁰.- Iglesia de San Lorenzo de Florencia, I. del Sto. Espirito de Florencia, S. Andrea de Mantua, Sta. Maria degli Angeli de Florencia, Sta. Maria delle Carceri de Parto, S. Sebastiano de Mantua, S. Biaggio de Montepulciano, S. Pedro de Roma, Sta. Maria di Monserrat de Roma, S. Giorgio de Venecia, Il Redentore de Venecia, S. Fedele de Milán, Il Gesù de Roma, Thomaskirche de Leipzig, I. Vienne (Francia) I. San Hermenegildo de Sevilla, I. Sta. Anna dei Palafrenieri de Roma, I. Incurabili de Venecia.

¹¹.- S. Paolo Fuori le Mura, S. Peters Basílica, S. Giovanni in Laterano, S. Maria Maggiore.

¹².- Iglesia de San Lorenzo de Florencia, Iglesia del Sto. Espirito de Florencia.

El equipo de trabajo que esta realizando esta investigación, con presupuesto inicial para tres años, esta compuesto por:

“...nueve investigadores, seis de ellos vinculados a la universidad, más concretamente al IUACC de la Universidad de Sevilla: tres doctores en física, dos doctores en Arquitectura y un ingeniero que está haciendo su tesis doctoral; dos investigadores del IPCE del Ministerio de Cultura: un arquitecto que ha coordinado el Plan Nacional de Catedrales y una antropóloga que ha coordinado el Plan Nacional del Patrimonio Inmaterial. Se cuenta asimismo con una colaboradora, que además de concertista, es experta en órganos catedralicios.”

Este proyecto, inicialmente, coincide con los planteamientos de esta memoria, puesto que pretende “caracterizar el comportamiento acústico de las principales catedrales andaluzas: Cádiz, Córdoba, Granada, Jaén, Málaga y Sevilla, con el objetivo de implementar un modelo analítico capaz de describir el campo acústico en el interior y elaborar los adecuados modelos 3D para simular y auralizar, con perspectiva histórica, dichos campos sonoros.”

Comentar que el artículo publicado es una declaración de intenciones. Únicamente coincide con esta memoria en parte de los planteamientos iniciales, los cuales se expresan claramente en el mismo artículo, no aportando ningún resultado ni análisis de proceso concreto, todo lo contrario que el trabajo presentado en ISVA, Valencia 2011 “SIMULACIÓN ACÚSTICA Y VIRTUALIZACIÓN EN RECINTOS DE CULTO” (Teofilo Zamarreño, Miguel Galindo y Sara Girón) en el que se publican los datos y resultados de las simulaciones con abundantes comentarios así como la propuesta de rehabilitación de la Iglesia de San Lorenzo de Sevilla.

3º.- Calabria Ordóñez, Jesús; Martín Cruzado, Carlos G. y Luna Ramírez, Salvador, del Dpto. Ingeniería de Comunicaciones de la ETSI Telecomunicaciones de la Universidad de Málaga, en su ANALISIS ACÚSTICO DE TRES IGLESIAS CON DISTINTAS TIPOLOGIAS EN MALAGA, presentan parte de los resúmenes de las mediciones realizadas en cada uno de los tres templos y analizan los resultados de los siguientes parámetros, el tiempo de reverberación, (TR) la claridad musical, (C_{80}) la definición (D_{50}) y el STI.

El interés de este trabajo es que uno de los templos analizados, es la S. I. B. Catedral de Málaga, (119.224 m3) si bien todos los datos acústicos

analizados, son obtenidos por medio de mediciones realizadas *in situ*, tomando como referencia la ISO-3382. Acústica, a diferencia de este trabajo en el que todos los parámetros acústicos que vamos a estudiar, son obtenidos por simulación, como ya sabemos. No obstante estos datos son una referencia más.

4º.- Otro trabajo que nos llama la atención, por su título, es el de Planells et al. ELABORACIÓN DE MODELOS PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO EN ENTORNOS VIRTUALES, presentado en ISVA-2011, en el que apuntan algunos de los detalles importantes del proceso de modelización, si bien no acaban de explicar como resuelven muchos de los problemas que se plantean durante el proceso, dando la impresión de que falta una segunda parte.

5º.- Uno de los artículos más interesantes que hemos localizado es el de Álvaro Romero et al. "Estudio y rehabilitación acústica de la iglesia San Agustín de Vinaroz" (Castellón) publicado en el número 41 de la Revista de Acústica, (2010) en el que el objetivo principal es la rehabilitación de la iglesia, para lo cual, es imprescindible la realización de un estudio acústico, puesto que se va a realizar un cambio de uso. En este artículo nos describen todo el proceso de una forma bastante clara, para el software de simulación utilizado el EPIDAURE.

Otra de las coincidencias de este artículo con este trabajo es que no se realizan mediciones *in situ*, proponiendo su ejecución al final del trabajo para comprobar la bondad de la simulación.

El artículo después de la introducción nos comenta la "Historia y características constructivas" de la iglesia, de 4.900 m³. En el tercer punto expone el proceso de modelización, definiendo las superficies con las coordenadas de sus respectivos vértices, partiendo de la planta. En nuestro caso no seguiremos este proceso, puesto que se trata de otro programa de modelización, pero con los mismos objetivos y los pasos básicos similares, puesto que hay que definir las superficies (530) y sus coeficientes de absorción, (se consideran 5 distintas) así como la posición y características de la fuente y los receptores. Comentando las gráficas, mapas y resultados de los siguientes parámetros; tiempo de reverberación, nivel de presión sonora, definición, D₅₀, claridad D₈₀, y para la palabra el STI y el RASTI.

Continúa el trabajo con unas recomendaciones, y un análisis de los resultados de las propuestas de acondicionamiento. Comparando las dos situaciones, donde se aprecia la mejora de los parámetros acústicos considerados. El trabajo termina con las conclusiones, que se resumen en dos propuestas: 1ª aumentar la absorción de la sala, 2ª disminución del volumen.

6º.- El artículo de Álvarez, L. et al. "INITIAL ACOUSTIC MODEL TO SIMULATE THE SOUND FIELD OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE" (Modelo acústico para simular el campo sonoro de la Catedral de Sevilla) nos interesa especialmente porque en él se expone parte del proceso de simulación de la mencionada catedral y comentan algunos de los problemas que se han encontrado. En este trabajo "el modelo virtual creado se calibra con las medidas experimentales del T30, mediante un proceso iterativo".

Este equipo de la Universidad de Sevilla tiene varios trabajos publicados. En Pamplona en 1992 presentaron varias comunicaciones sobre "Parámetros acústicos medidos en la Catedral de Sevilla" y proyectos de investigación en marcha en este campo, como BIA2010-20523.

En este trabajo la simulación se realiza con CATT-Acoustic v8k, analizando exclusivamente los parámetros acústicos monoaurales y anunciando un "...ambicioso trabajo sobre este espacio, que pretende incorporar la simulación de las respuestas al impulso binaurales y tridimensionales, y de la implementación de auralizaciones, para recrear el comportamiento acústico..." después de una breve descripción de la historia de la catedral, nos comenta el proceso de medición (UNE-EN-ISO 3382) y justifica el rango de frecuencias utilizado (125 Hz a 4000 Hz).

Una vez comentado el proceso de medición y las herramientas utilizadas, explican el proceso de simulación, con el objetivo de crear un modelo geométrico virtual, compuesto por 7.516 planos y un volumen de 216.192 m³. Comentando las diferencias de resultados de los parámetros medidos, T₃₀, EDTs, T_s, D₅₀, C₈₀, J_{LF}, G y STI. Publican también una tabla de coeficientes de absorción acústica por frecuencias, asociados a los principales materiales (8 Uds.) utilizados en la simulación.

Concluyen que las diferencias entre valores calculados y valores medidos en cada punto receptor no son desproporcionadas, por banda de octava, es por lo

que puede considerarse una buena simulación. No obstante, y siendo un trabajo muy interesante, las diferencias con nuestro planteamiento son sustanciales.

Como se ha comentado al inicio de este apartado no se van a citar toda la documentación consultada, (bibliografía) si bien nos ha llamado la atención la cantidad de trabajos y proyectos de investigación, unos terminados y otros en marcha, relacionados con las catedrales e iglesias, principalmente a nivel teórico que se han publicado y que proponen líneas de investigación muy interesantes.

7º.- Para terminar con los comentarios de algunos de los trabajos consultados y antes de comenzar con el estudio de nuestra catedral, queremos hacer referencia al magnífico y denso trabajo de Joaquina Labajo Valdés, con su peculiar redacción. “La dimensión sonora del espacio arquitectónico: La Catedral de Valladolid”, el único específico sobre la acústica de la catedral vallisoletana, que hemos podido estudiar.

El objetivo del mismo es “ofrecer una pequeña aproximación hacia una lectura otra del edificio arquitectónico¹³, la que aporta la valoración acústica de la organización del espacio”.

La primera reflexión interesante que nos llama la atención, es una cuestión que no siendo objeto de investigación en esta ocasión, flota desde un principio en un trabajo como este y que se puede resumir con la pregunta: ¿Se tuvo en cuenta la acústica en la redacción del proyecto? En el artículo se mantiene que lo obvio no se refleja habitualmente en las fuentes escritas, por lo que no se puede afirmar que la acústica del templo no se contemplara es su proyecto original de algún modo, sabiendo que el templo es “un lugar en donde el sonido hecho palabra, canto o música, es el centro del propio objeto de su edificación”, con lo que “... no permite deducir que el resultado sonoro haya podido quedar abandonado por los constructores a su libre albedrío.”

Otro apartado interesante son los comentarios sobre el campanario y la afinación de las campanas (la mayor en Mi bemol) así como la orientación de estas.

¹³.- Entendemos que quiere decir “...ofrecer una pequeña aproximación hacia otra lectura del edificio arquitectónico”.

“Concluyendo: El campanario de la catedral vallisoletana, imagen sonora de la pretendida armonía del templo, constituye un sistema simbólico, consagrado por sus propias proporciones, que pone de manifiesto la importancia de condicionantes que, a su vez, constituyen realmente el propio centro de su valor mágico-místico ante la comunidad religiosa”.

En la última parte del artículo que titula “EL SILENCIO INTERRUMPIDO” repasa las características de la liturgia medieval y nos introduce en el análisis de la acústica de salas, considerando el recinto con la geometría del coro bajo desaparecido y comentando una cita muy interesante de L. Alas (“Clarín”) de su novela *La Regenta*: “La misteriosa vaguedad del cántico sagrado que bajando del coro nada más parece descender de las nubes”. Continúa analizando la trayectoria de los rayos para explicar esa sensación acústica en la catedral “cuando el coro o la capilla polifónica cantan salmos...” aportando dos figuras, un croquis de una sección, la Fig. 3 y un esquema de la planta la Fig. 4, donde podemos ver algunas trayectorias que confirman la explicación de la cita y el comportamiento del sonido en la sala.

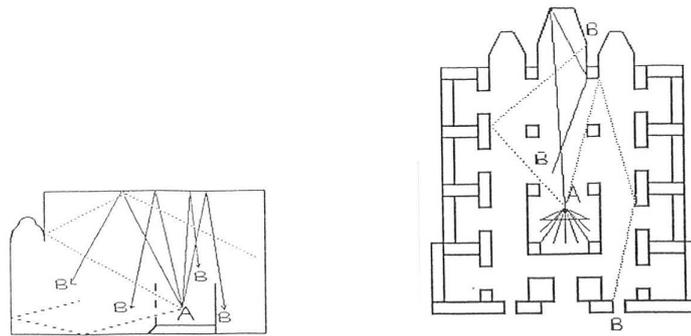


Figura 1.6. Esquemas analizados, sección longitudinal (3) y planta (4).

Terminando con una explicación de la nueva geometría y usos de la sala.

“La nueva disposición interior de la catedral –con el acercamiento al pueblo de pulpitos, siguiendo la construcción acústica de pequeños templetos y con el órgano y música en la elevada posición sobre el muro de la entrada- determinará a partir de ahora, contundentemente, que la función de la música sea secundaria respecto de la palabra y el gesto del oficiante, de tal forma que el placer de su escucha no se sobreponga –como lo hiciera en tiempos anteriores- sobre el mensaje de la palabra”.

Opiniones que ayudan a entender los cambios sufridos y el estado actual de la geometría del Monumento.

1.4.- METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

METODOLOGIA

Para la obtención de los parámetros acústicos más representativos de la calidad sonora de una sala ya construida, como es el caso, existen dos opciones. La primera es la medición *in situ* de los mismos, opción que nos daría los parámetros exactos en el momento de la medición. La segunda es la simulación en un programa específico. Esta última opción es más versátil y se pueden plantear distintos supuestos, con un coste mucho más reducido y con unos resultados similares a los obtenidos con las mediciones *in situ* (Zamarreño, T. Galindo, M. Girón, S. 2011). En cualquiera de los dos casos la documentación gráfica es una pieza básica de un trabajo de acústica arquitectónica. Evidentemente los requerimientos de esta documentación para cada una de estas dos opciones no son iguales, pero siempre hace falta un soporte gráfico para poder planificar los trabajos correctamente y exponer los resultados de las mediciones en la primera opción y en la segunda se necesitan para poder empezar a trabajar.

La metodología que sigue este trabajo a la hora de la caracterización acústica de la inconclusa catedral de Valladolid, en un primer paso, es la de cualquier trabajo de restauración arquitectónica. El levantamiento de un edificio a restaurar es un proceso que está muy depurado, puesto que son muchos los proyectos de restauración ejecutados, en consecuencia, uno de los primeros objetivos de esta memoria es la modelización de las distintas naves y capillas, para ello contamos con numerosa documentación y estudios, entre los que se pueden destacar los siguientes: las dos fases del *Plan Director*, y el trabajo de Chueca, F., *la Catedral de Valladolid*. Trabajos que han recopilado los datos suficientes como para poder realizar un modelo en 3D, de la catedral.

En este apartado pretendemos responder a las siguientes preguntas: ¿Qué pasos tenemos que dar para la obtención de los parámetros acústicos de la catedral? y ¿Qué herramientas necesitamos utilizar en este estudio?

La respuesta a estas preguntas se puede resumirse en los siguientes puntos:

1º.- La toma de datos, en esta ocasión, pasa a ser una comprobación a realizar *in situ*, que complementa la documentación gráfica disponible. Debido

a la cantidad de proyectos y trabajos publicados, las únicas mediciones realizadas han sido la comprobación de algunas cotas del levantamiento topográfico. Previa autorización verbal, del responsable del Patrimonio Arzobispal.

2º.- El segundo paso será dibujar el modelo, que es el volumen del medio, (naves, salas y capillas) en el formato “caras 3D”, con el programa AutoCAD, que es la herramienta que utilizaremos para dibujar. En este proceso facilita mucho las cosas conocer los sistemas constructivos empleados para su ejecución y las características de los materiales, así como tener claro las simplificaciones que se pueden hacer del modelo real.

3º.- Una vez que disponemos del archivo o modelo, en formato AutoCAD 3D, del medio a estudiar, hay que transformarlo en series numéricas (MASTER. GEO) de forma que podamos leerlo con el programa de simulación, (Catt-Acoustic) también tenemos que definir los coeficientes de absorción y dispersión de los diferentes materiales, entre otras.

4º.- Con el modelo virtual transformado en archivo de texto (MASTER. GEO) debemos de eliminar las fugas de rayos o ajustarle para que los datos que obtengamos del programa de simulación, Catt-Acoustic, sean fiables.

5º.- El ultimo paso será estudiar y comparar los parámetros obtenidos en la simulación con los óptimos para un recinto como el del estudio, tanto para la inteligibilidad de la palabra como para la música, con las variantes propuestas.

ESTRUCTURA

Esta memoria esta dividida en siete capítulos y cuatro grandes apartados, en los que exponemos el proceso seguido para la obtención de los objetivos principales planteados en el primer punto de este capitulo.

Una primera parte introductoria del planteamiento del trabajo, que consta de dos capítulos, en la que fijamos los objetivos principales, hacemos un breve repaso de los conceptos de la acústica grafica o arquitectónica, comentamos algunos trabajos similares de otros monumentos y explicamos la metodología seguida, junto con este apartado de la estructura del trabajo.

En el segundo capítulo que, incluimos en esta primera parte, repasamos la historia del monumento, el mapa de ruido del entorno de protección y estudiamos los parámetros arquitectónicos y los acabados interiores.

En la segunda parte desarrollaremos el trabajo. En la que incluimos los capítulos 3, simulación acústica y 4, cálculos y análisis acústicos.

La tercera parte esta dedicada a las conclusiones del trabajo, capítulo 5.

Terminando con el cuarto apartado (capítulos 6 y 7) en el que exponemos la bibliografía y los tres anexos, extensión en la que incluimos las definiciones de algunos conceptos empleados en el trabajo, una sesión de CATT comentada y la documentación grafica.

Otro punto que queremos comentar es que en este texto se utiliza la simbología normalizada internacionalmente por ISO (Organización Internacional de Normalización) e IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) puesto que es la que emplea el programa de simulación.

CONTENIDO DEL CD

El CD, adjunto, contiene los PDF de esta memoria, la presentación y los archivos generados por el programa de simulación, no incluidos en la memoria, así como las geometrías de los distintos modelos utilizados en el cálculo.

2.- EL MONUMENTO

2.1.- SU HISTORIA

Este breve repaso de la historia del complejo catedralicio tiene el propósito recordar los datos que consideramos más importantes, por orden cronológico, así como los personajes más relevantes desde el punto de vista arquitectónico, para ayudarnos a entender su estado actual y poder modelizar correctamente el espacio de la inconclusa Catedral Herreriana, objeto de esta memoria acústica.

En la actualidad, sobre el solar de la catedral, se pueden ver los restos de las dos primeras Colegiatas (la primera románica y la segunda gótica). Se tiene documentada una tercera de Diego de Riaño y Rodrigo Gil de Hontañón, de la que no se conservan nada más que los cimientos, aprovechados en la cuarta Colegiata. Además hay un edificio de servicio de reciente construcción. En total 5 edificios distintos resultado de varios siglos de construcciones y ampliaciones de la primitiva iglesia, que fundara el repoblador de la ciudad el Conde Ansúrez, en torno al 1084, cuando la Colegiata ya figuraba como entidad jurídica, pero la carta de fundación no se extendió hasta 11 años después, en 1095 (Martín, J. Urrea, J. 2001).

La primera ocupación de la que tenemos noticias en el solar en el que actualmente se ubica la catedral fue un asentamiento romano, puesto que Juan Antolínez de Burgos, hablando de la construcción de la Catedral Herreriana dice:

“Poco después cavando en otra parte para fundar cimientos á un pilar, se descubrió un pedazo de aposento labrado á lo mosaico con azulejos de diferentes colores y de tamaño de las habas muy pequeñas, indicios y rastros todos que nos dan á conocer la mucha antigüedad de Valladolid.”

Las intervenciones arqueológicas que se han realizado en los dos últimos decenios en este sector urbano, en torno a la catedral y la Iglesia de Nuestra Señora de la Antigua, han venido atestiguando repetidamente la existencia de este núcleo de población que habría sido fundado hacia el cambio de era y que se prolongaría a lo largo de toda la etapa imperial.

Después, suponemos, que este solar quedaría abandonado durante varios siglos hasta que, a finales del siglo XI, el Conde Ansúrez expandiera la ciudad al otro lado del Esgueva, del que se situaba el núcleo de la primitiva ciudad de Valladolid.

En el solar de la actual catedral se construyó una primera Colegiata románica, (figura 2.1) de una sola nave, dedicada a Santa María, bajo los auspicios del mencionado Conde, con la pretensión de ser la cabeza religiosa de su feudo e iglesia colegial. De este primer edificio románico, todavía se conservan, a la vista algunos pocos restos ya restaurados, como la torre-pórtico (figura 2.5).

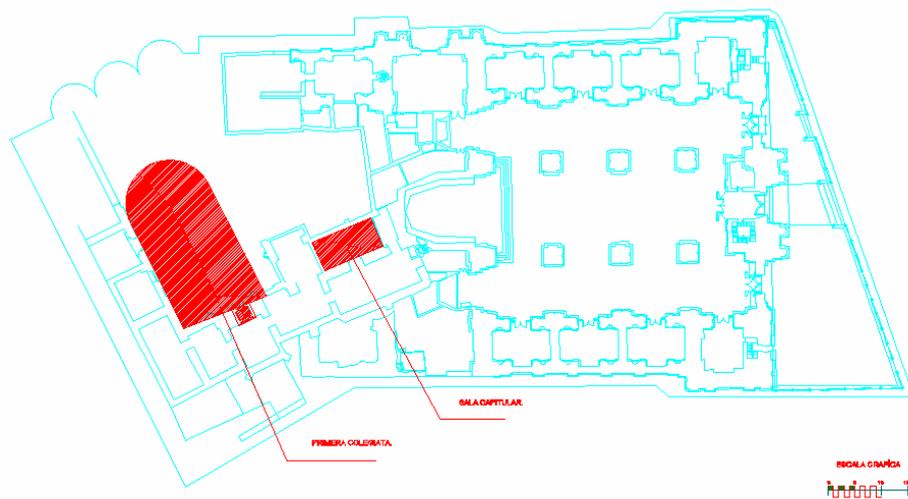


Figura 2.1. Ubicación de la Primera Colegiata Románica en el recinto catedralicio, Siglo XI.

La segunda Colegiata, de estilo gótico (figura 2.2) fue edificada sobre la única nave de la anterior, (1219-1230). Esta segunda Colegiata fue la Abadía del entonces canciller de Fernando III el Santo, D. Juan Domínguez. Se conservan las ruinas de sus portadas Norte y Sur y algunas de las capillas. En un intento de recordar esta Colegiata, en la ubicación de los desaparecidos pilares se han plantado cipreses, que ocultan las ruinas a los no iniciados, pero que permiten visualizar la antigua planta.

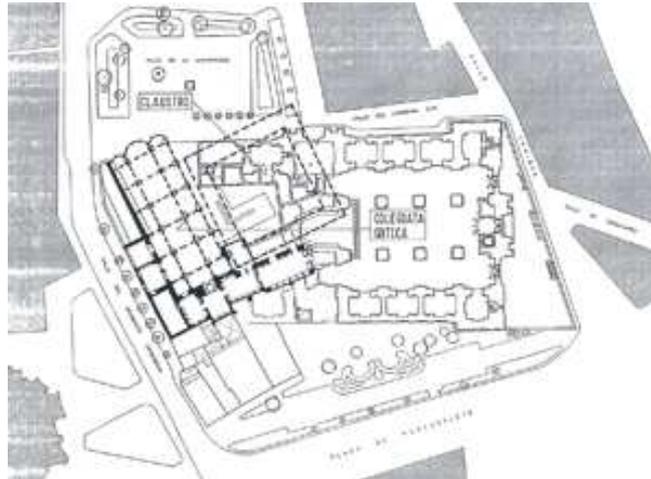


Figura 2.2. Planta de la segunda Colegiata Siglo XIII (Plan director).

El conjunto preexistente de la segunda Colegiata se amplía con varias capillas funerarias y un claustro nuevo cuya construcción se inicia en 1318 y termina a principios del siglo XV, del que solo quedan los pies y parte del muro del evangelio.

La tercera Colegiata se empezó a construir el 13 de junio de 1527¹, con la traza del proyecto redactado por los prestigiosos arquitectos de la época, Diego de Riaño, Juan de Álava, Francisco de Colonia, Juan Gil de Hontañón y Rodrigo Gil de Hontañón, ganador del concurso convocado por el Cabildo. El nuevo edificio cambia la orientación de los dos primeros. La dirección de las obras es encargada a Diego de Riaño hasta 1534, sucediéndole Rodrigo Gil de Hontañón. De esta iglesia no se conserva nada a la vista, pues muy pronto se abandonó el proyecto por falta de recursos. (Martín, J. Urrea, J. 2001)

Un nuevo proyecto es encargado a Juan de Herrera² arquitecto del monarca³, que entrega los planos en 1580. La nueva iglesia aprovecha los cimientos de la tercera Colegiata, y los trabajos comienzan en 1582, dirigidos por Pedro de

¹.-Fecha que consideramos también comienzo de la curia, puesto que esta documentado que los cimientos de la tercera Colegiata son aprovechados por esta.

².- Juan de Herrera (1530-1597) Arquitecto, matemático y *geometra*. Nacido en *Roiz*, Cantabria. Estudio Humanidades y Filosofía en la Universidad de Valladolid. En 1583 funda la academia de matemáticas y delineación. El sobrio estilo arquitectónico llamado herreriano, en su honor, fue representativo del reinado de Felipe II. Su obra más importante es el Monasterio del Escorial, que Juan de Herrera termino en 1584, empezándose con proyecto de Juan Bautista de Toledo, su principal maestro desde 1563 a 1572. Fue autor de un curioso *Tratado de la figura cúbica*.

³.-Felipe II de Austria, llamado El Prudente (1527-1598)

Tolosa. A su muerte le sustituyó Diego de Praves, que dirigía en Valladolid otras obras proyectadas por el arquitecto real, que residía en Madrid y nunca visitó las obras.

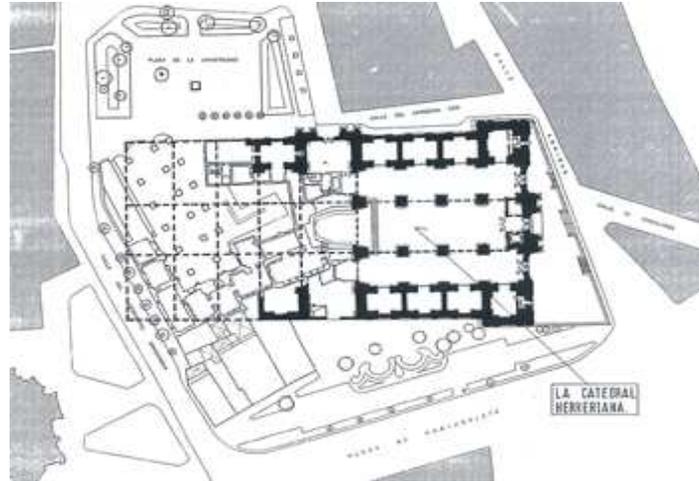


Figura 2.3. Planta Herreriana (Plan director).

El origen de la diócesis no fue fácil, pues en 1103, el conde Ansúrez encomendó su abadía de Valladolid al obispo de Palencia Raymundo. A la vuelta de su auto exilio el conde recuperó su abadía-colegiata pero el nuevo obispo de Palencia inició una disputa que provisionalmente resolvió el papa Inocencio II, confirmando la vinculación de la colegiata a la sede de Palencia, desencadenándose una pugna abierta entre las dos villas que finalmente resolvió el papa Clemente VIII, que la transforma en Iglesia Catedral con sede episcopal, sin estar acondicionada para officiar, a petición de la corona, (Felipe II) y la consagra en 1595⁴, siendo obispo de Palencia Martín Aspi Sierra, de la que se independizó con territorio muy pequeño, para no perjudicar las rentas de las diócesis cercanas, clave de las penurias económicas del Cabildo y del monumento.

Las capillas del lado del evangelio (Figura 2.4) se concluyen en 1612 y la de la Inmaculada, hoy Sacristía, en 1695, un siglo después de que fuera consagrada como Catedral.

Las naves de la epístola (Figura 2.4) se cierran en 1661 y la bóveda de la Nave Central en 1662, concluyendo la Capilla de San Miguel en 1712.

⁴.- Tan solo 13 años después del comienzo de las obras de esta fase.



Figura 2.4. Nave menores, Evangelio (Izq.) y Epístola (Der.)

La primera función religiosa se celebra el 26 de agosto de 1668.

La Torre de Evangelio en la actualidad, prácticamente desaparecida, se termina en 1709, se repara en 1726 y se hunde en 1841.

El hastial superior de la fachada principal, tal como la conocemos, lo rediseña Alberto de Churriguera, modificando el proyecto de Juan de Herrera, terminándose en 1729.

La Torre SO (figura 2.6) o del evangelio de 270 pies castellanos (75,22 m.) se arruina, probablemente por una deficiencia constructiva (agravada por causas que desconocemos), el 31 de mayo de 1841, a eso de las cinco de la tarde, sin causar ninguna víctima atrapando a la mujer del campanero Juan Martínez (Sambricio, C. Roldán, G. Villalobos D. y Rivera, J. 1987).

Por los documentos que nos han llegado, tenemos algunas noticias de los trabajos de desescombro, que nadie quería ejecutar y que finalmente son realizados por el oficial de albañilería Francisco González, condenado en el presidio correccional, a cambio de obtener el indulto.

“Así se verificó y en el tiempo de un mes derribaron lo que había quedado de la cúpula, las dos partes del octágono, o sea cuatro cuerpo, y las tres del tercero en que estaban los arcos que se llamaban cuatro bientos bajando con tornos tres campanas y los balaustres y bolas del corredorcillo que rodeaba el octágono”

Los restos de la torre arruinada se puede observar en la actualidad, puesto que no se ha vuelto a rehacer. La torre actual es la del lado de la Epístola, y esta coronada con una estatua del Corazón de Jesús, del escultor Ramón Núñez, sobre una bóveda de piedra caliza, para la que se solicitó licencia a la "Corporación Municipal" el 7 de agosto de 1922.

En 1960 se remata la parte alta de las capillas de la nave de la epístola y la zona inferior de la Portada Este del Crucero, después de lo cual no se ha vuelto a ampliar o continuar con la traza de Juan de Herrera. Las obras que se han realizado posteriormente son de mantenimiento, acondicionamiento y mejora.

El Complejo Catedralicio existente puede dividirse en los siguientes inmuebles:

- .- Torre-pórtico románica de la primera Colegiata (figura 2.5).
- .- Restos de la segunda Colegiata gótica, que en la actualidad se destinan a Museo Diocesano.
- .- Edificio provisional para servicios de la catedral como Sala-Capitular, despachos, administración, aseos y una vivienda ocupada por el conserje del Museo
- .- La inconclusa Catedral Herreriana, cuyo comportamiento acústico vamos a estudiar en el presente trabajo



Figura 2.5. Estado actual de la torre pórtico de la primera Colegiata.

2.1.2.- INTERVENCIONES CONOCIDAS

Este listado de los arquitectos y maestros de obra más importantes que han intervenido en el monumento, no exhaustivo, nos puede ayudar a conocer un poco más el actual Complejo Catedralicio de Valladolid.

Año 1527. Los primeros arquitectos, como tales, de los que conocemos su nombre son los ganadores del concurso convocado para la tercera Colegiata: Diego de Riaño, Juan de Álava, Francisco de Colonia, Juan Gil de Hontañón y Rodrigo Gil de Hontañón. Obras que dirigieron inicialmente, como maestros de obra: Diego de Riaño, y Juan de Cabañuela (Alonso, B. 2004). Sucediéndoles en 1536, Rodrigo Gil de Hontañón. (Martín, J. Urrea, J. 2001)

En el año 1580 Juan de Herrera concluye los planos de la cuarta Colegiata, cambiando totalmente el estilo arquitectónico, que pasa del gótico al Clasicista, estilo que se basa en las construcciones de la antigua Roma, inspiradoras de la arquitectura del Renacimiento y del estilo Herreriano.

Año 1582. El primer responsable de este nuevo proyecto fue un colaborador de Herrera en las obras de El Escorial y Villagarcía de Campos, Pedro de Tolosa, que continuo la ejecución de la cuarta Colegiata aprovechando los cimientos y materiales de la tercera, por imposición del Cabildo, durante un año, sucediéndole su hijo Alonso de Tolosa en la dirección de las obras durante 6 años.

Año 1589, el arquitecto Diego de Praves, que muere en 1620, dirigía las obras que posteriormente continuaría su hijo, Francisco Praves.

Año 1636, Juan de Répide. Maestro de obras y sucesor de Francisco Praves en la dirección de las obras.

Año 1703, se levanta la torre del lado del Evangelio, siguiendo las trazas de Herrera, siendo el maestro de cantería Antonio de la Torre que concluye en 1709.

Año 1729, se concluye el proyecto de Alberto de Churiguera, del hastial superior de la fachada principal (obras que no dirige), ejecutándose a un tiempo que el polémico atrio actual.

Año 1746, Fray Antonio de San José Pontones, repara la Torre del Evangelio.

Año 1761, Ventura Rodríguez, redacta el proyecto para zunchar la Torre del Evangelio, obra que dirige Manuel Godoy, maestro arquitecto. La obra tarda en terminarse 3 años.

Año 1780, el maestro de obras del Cabildo Francisco Javier de la Rodera, realizó el cuarto de la maquinaria del reloj⁵.

Año 1784, Juan de Urrechaga⁶, arquitecto vasco, continúa las obras del templo por la capilla del crucero, hasta 1788-89 (figura 2.6).



Figura 2.6. Restauración de la fachada norte “que cae hacia la parte de la esgeva” (2007).

Año 1788. El Cabildo encarga un reconocimiento de la torre a Francisco Álvarez Benavides, y Juan de Urrechaga, arquitectos, e independientemente otro informe a Francisco Javier de la Rodera, maestro de obras y vecino de Valladolid.

⁵.- Archivo Diocesano, Libro de cuentas, 1780-1781, folios 156-157.

⁶.- Ver “La Catedral de Valladolid y su maqueta” pagina 229-230 de M^a José Redondo Cantera.

Años 1792-1793, el maestro de obras Ventura González Sanz, entre otras labores desmonta el andamio con el que se estaba ejecutando la capilla del crucero que cae hacia la parte de la esgeva (figura 2.7).

Año 1806. El Cabildo encarga el reconocimiento de la torre a Fray Cristóbal Tejeda, arquitecto del Rey, religioso de la orden de San Jerónimo, que reconoce la fábrica junto con Ventura González Sanz.

Año 1812, Ramón Serrano, maestro de obras, informa la colocación de los colaterales de mármol en la catedral e informa de la solución para reparar el piso superior de madera de la Torre.



Figura 2.7 Zona del crucero “que cae hacia la parte de la esgeva” (2011).

Año 1820. El Cabildo encarga un nuevo informe del forjado de madera del piso superior a Pedro García González, arquitecto académico de merito de las Reales Academias, director de matemáticas y arquitectura de la Purísima, maestro mayor y titular de la ciudad de Valladolid.

Año 1862, Proyecto de dos Torres simétricas, firmado por los arquitectos Fernández Sierra, Ortiz de Urbina, Miranda, Rezola e Iturralde.

Año 1878, proyecto de la torre actual del lado de la Epístola de Antonio Iturralde, se ejecuta en dos fases las obras duran hasta 1896, rematando con esta un tejado.

Año 1922, el Cabildo solicita licencia para “construir sobre la torre la cúpula y remate de la misma de piedra de sillería, como asimismo poner verjas de hierro exteriores en todos los huecos de campana para evitar contingencias desagradables...” y en 1923, se coloca la escultura de hormigón armado de Ramón Núñez.

En 1942 se celebró un Concurso Nacional de Arquitectura para solucionar el cierre de la Catedral de Valladolid con el tema “Anteproyecto de solución del crucero de la Catedral de Valladolid y urbanización del espacio que la rodea”, concediendo el primer premio a Carlos de Miguel y Manuel Martínez Chumillas, proyecto que no se ha ejecutado.

Año 1947, Fernando Chueca Goitia, realiza un estudio muy interesante, previo a la participación en el concurso de 1942.

Año 1960, Luis Cervera Vera, rehabilita las cubiertas.

.- En 1961, redacta el “Proyecto de reparación. Descubrir y limpiar arcos primitivos”. En el que rehabilita las capillas de la Colegiata medieval para destinarlas a Museo Diocesano. Proyecto muy indefinido.

.- En 1962, “Proyecto de restauración de la Capilla de San Llorente en la Catedral de Valladolid”. La intención es recuperar el estado original de la capilla.

Desde 1962 a 1969, Anselmo Arenillas Álvarez, proyecta y dirige las siguientes obras:

.- Cuerpo bajo de la fachada del crucero a la Plaza de la Universidad y de la parte alta del las capillas de la Epístola, respetando la traza de Herrera.

.- También dirige las obras del cierre del crucero, en este caso según proyecto de Gratiniano Nieto, Director de Bellas Artes, con el título: “Proyecto de Restauración de las cubiertas y cantería de la fachada de mediodía de la Catedral de Valladolid”

.- “Proyecto de obras de recalce y restauración de la puerta Sur de la Iglesia catedral de Valladolid”. Este proyecto de recalce se realiza por problemas con el terreno, que fallaba a cuatro metros, por lo que se hace necesario reforzar los cimientos.

.- Cornisas de la torre izquierda.

- .- Habilitación de la nave alta de capillas para museo.
- .- Restauración de la capilla de la antigua Colegiata.

Año 1967, José Antonio Arenillas Asín: Proyecto de coronación de la puerta del Cardenal Cos en la Catedral de Valladolid. (No se ejecutó)

Año 1969, Anselmo Arenillas Álvarez, Restauración urgente de la cubierta de la Catedral de Valladolid. En estas fechas todavía se conservan las cerchas de madera.

Año 1973, Ana Iglesias González, “Obras de ordenación del entorno de la Catedral de Valladolid”. Básicamente consolida las ruinas de la Colegiata, la ejecución del jardín en el interior de la Colegiata y en la Plaza de la Universidad, y cerramiento de la parcela con la colocación de la verja existente.

Año 1974, Luis Cervera Vera, “Proyecto de Restauración de las cubiertas de la Catedral de Valladolid”. Sustituye las cerchas de madera por otras metálicas, revoltón de ladrillo, capa de compresión y cubierta de teja. También ejecutan un zuncho de hormigón armado perimetral. Las limas quedan retranqueadas de la fachada y provistas de bajantes por el interior de la fábrica de la fachada.

Año 1982, Víctor López Cótelo, “Proyecto de Restauración de la Catedral de Valladolid, Reparación de tejados y restauración del atrio de entrada”. En esta intervención se coloca “Uralita” mini onda de 3 centímetros de espesor en la cubierta del archivo, también se coloca un aislamiento de poliestireno entre los rástreles de cemento y por el interior un falso techo de fibras de madera aglutinada. En lo que respecta al atrio se proyecta la pavimentación, consolidación del murete y restauración de la balaustrada, así como la carpintería y cerrajería. En 1983 “Obras de emergencia en la Catedral de Valladolid”. En esta intervención se realiza en las cornisas del ángulo de las fachadas Norte y Poniente, instalando grapas metálicas y mortero de resina epoxi.

Desde el año 1988, Elesio Gatón, viene redactando y dirigiendo todas las obras realizadas en la catedral como:

- .- “Obras de adecentamiento de la S. I. Catedral de Nuestra Señora de la Asunción de Valladolid”. En esta ocasión principalmente se sustituyó la

instalación eléctrica, se eliminaron goteras, y se adecentaron los paramentos interiores, preparando el espacio interior para la primera exposición de “Las Edades del Hombre”.

.-1994 “Obras urgentes para la restauración de cubiertas en el Museo Diocesano y Catedral de Valladolid”. Se recupera la imagen de la torre románica, reconstruyendo el volumen del primer cuerpo.

.-1995, “1ª Fase del Plan Director de la Iglesia Catedral de Nuestra Señora de la Asunción de Valladolid”. De las siete intervenciones propuestas en esta fase todas ellas se han llevado a cabo, como vemos en los proyectos posteriores.

.-1996, “2ª Fase del Plan Director de la Iglesia Catedral de Nuestra Señora de la Asunción de Valladolid”.

.-1997, “Proyecto de Restauración zona de cubiertas del lado de la epístola de la S.I. Catedral de NTRA. SRA de la Asunción de Valladolid”.

.-2000, “Proyecto de Adecuación del Archivo Diocesano del lado de la Epístola de la S.I. Catedral de NTRA. SRA de la Asunción de Valladolid”.

Elesio Gatón, también es el redactor del último proyecto, “Restauración de las torres de la fachada de la Iglesia Catedral de Nuestra Señora de la Asunción de Valladolid y la accesibilidad y adecuación para visita pública de la Torre sur” que todavía no se ha ejecutado, pero que ya tiene el convenio de colaboración, que fue firmado el 18 de julio de 2012, por las promotoras: la Consejería de Cultura y Turismo de la J.C. y L., la Asociación “Amigos de la Catedral de Valladolid”, el Ayuntamiento de Valladolid y el propietario del inmueble, que le cede para su restauración y acondicionamiento, el Arzobispado de Valladolid. El proyecto pretende ofrecer al turista una nueva actividad, distinta de la visita al Museo Diocesano, en la catedral e incrementar los escasos recursos del Cabildo Catedralicio.

2.2.- ENTORNO ACÚSTICO

En este apartado vamos a estudiar el entorno de protección de la catedral, desde el punto de vista acústico y nos fijaremos como objetivo justificar los valores de ruido de fondo utilizados en la simulación. Valores por bandas de octava estimados, que comparamos con otros estudios de catedrales publicados; como los de Zamarreño, T. *et al*, “Parámetros acústicos medidos en la catedral de Sevilla”. Esto es debido a que en este trabajo no se van a efectuar mediciones *in situ* y estos valores son necesarios para la simulación y cálculo de los valores del RASTI⁷ (“*Rapid Speech Transmission Index*”).

La contaminación acústica del entorno, junto con la maquinaria de las instalaciones del templo, son los responsables del ruido de fondo en la catedral. Como sabemos, el ruido de fondo existente en una sala contribuye sustancialmente a la pérdida de inteligibilidad de la palabra. Las principales fuentes exteriores generadoras del ruido que se han considerado son el tráfico rodado y el ocio. El inmueble está ubicado en una zona céntrica de la ciudad, con múltiples actividades como; comercial, residencial, oficinas y ocio.

El estudio acústico del entorno de la catedral lo basaremos en el mapa estratégico de ruido de Valladolid (2008). La propagación del sonido en el entorno urbano es otra disciplina totalmente distinta a la acústica de salas, con normativa y parámetros específicos, en los que no profundizaremos. El objetivo de este trabajo es una simulación del interior del templo, pero entendemos que el estudio no estaría completo sin mencionar las características acústicas que conocemos del entorno de protección.

En esta ocasión partimos de la premisa de que la contaminación acústica del entorno no afecta significativamente a las condiciones del interior del edificio, puesto que los cerramientos de la catedral son lo suficientemente gruesos como para impedir que ésta afecte o influya en las propiedades acústicas del interior, dadas las características constructivas de las fachadas, la escasa carpintería, ventanas termales de hormigón translucido y demás elementos de la edificación. Suponemos que no tendrá influencia, puesto que, dependiendo de la zona, el espesor de los muros oscila entre 5 – 10, pies castellanos⁸ (1,40 – 2,80 m) de dos hojas de sillería de piedra caliza rellenas. No obstante en

⁷.- RASTI; valor cuantitativo que simplídicamente nos mide la inteligibilidad de la palabra (0= inteligibilidad nula, 1= inteligibilidad total).

⁸ .- Un Pie castellano = 26,87 centímetros.

esta ocasión, como hemos comentado, disponemos del “Mapa estratégico de Ruido de Valladolid” para conocer los niveles de presión del entorno y las fuentes que lo generan (plano A.03.2).



Figura 2.8. Detalle, muro cerramiento y ventana termal de hormigón translucido.

2.2.1. ENTORNO FÍSICO

Todos los monumentos tienen un entorno de protección. En el caso de la Catedral de Valladolid este entorno está definido por la Resolución de 28 de julio de 2005, de la Dirección General de Patrimonio y Bienes Culturales, en la que se acuerda incoar el procedimiento de delimitación del entorno de protección de la Catedral de Valladolid, declarada Bien de Interés Cultural con categoría de Monumento el 4 de junio de 1931 (plano A.03.1).

En este apartado pretendemos reflejar las condiciones físicas de este entorno, basándonos en los mapas estratégicos de ruido publicados por el Ayuntamiento de Valladolid. No obstante, comentaremos otros aspectos generales que afectan al monumento.

Las coordenadas sexagesimales de la ciudad son $41^{\circ} 39' N$ y $4^{\circ} 43' O$, y la altura media sobre el nivel del mar de la ciudad es de 691 msnm^9 , siendo la superficie total del término municipal $197,91 \text{ km}^2$.

⁹.- Metros sobre el nivel del mar.

La climatología del entorno de la Catedral esta condicionada directamente por su ubicación en el Valle del río Pisuerga y tiene unas características muy peculiares, puesto que se sitúa en un enclave significativo dentro del área central de la Cuenca Sedimentaria de Castilla la Vieja. En ella confluyen tres cursos de agua, el Pisuerga y las dos Esguevas, siendo línea de encuentro entre los dos tipos de paisajes más característicos de las llanuras centrales: los Páramos de Torozos y del Cerrato, situados al Norte del Duero, y la Tierra de Pinares que se extiende al Sur. Lo más destacable de este espacio físico es la dualidad entre los dos paisajes citados, teniendo un ambiente muy húmedo y relativamente abrigado, con pocas masas vegetales.

2.2.2. MAPA DE RUIDO

Valladolid se ha configurado como el núcleo regional de mayor tamaño, lo que, unido a su importancia histórica y localización geográfica, han hecho de ella la capital de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, desde 1983, tras un periodo inicial de indefinición. En el contexto nacional, Valladolid aparece como una de las 10 ciudades mayores del estado, con un potencial demográfico entre la ciudad y su entorno de unos 400.000 habitantes.

La Directiva 2002/49/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, recoge la obligatoriedad de realizar mapas estratégicos de ruido y sus correspondientes planes de acción en aglomeraciones de más de 250.000 habitantes.

Con este mandato de la Directiva Europea el Ayuntamiento de Valladolid encargo el mapa estratégico de ruido a la empresa "Audiotec" que publicó en febrero de 2008.

Para la realización del mapa, el software empleado ha sido el "Predictor Type 7810" de Brüel & Kjaer, puesto que permite el cálculo y análisis de ruido de diversas fuentes por separado y su combinación y cálculo global.

El documento publicado por el Ayuntamiento tiene por objeto conocer la situación acústica de la ciudad para poder desarrollar los planes de acción, que pretenden minimizar el clima sonoro existente, prestando especial atención a los puntos críticos, como no podía ser de otra manera, en base a las fuentes identificadas. Para esto han dividido funcionalmente la ciudad en 41

barríos, si bien el mapa de ruido se ha realizado de todo el término municipal. Plano A.03.2.

El barrio en el que se ubica el monumento, conocido como Centro o Zona de la Catedral, no está definido específicamente en el estudio y probablemente, a la vista de la documentación gráfica, esté afectada o incluida en varios, como los denominados en el estudio “Plaza Mayor” o “Circular”.

Los 6 rangos de L_{den}^{10} considerados en el estudio son: < 55 dB(A), 55-60 dB(A), 60-65 dB(A), 65-70 dB(A), 70-75 dB(A), > 75 dB(A), haciendo una estimación de las personas afectadas. Los mapas publicados y revisados son:

Mapa de niveles sonoros, $L_{día}$ - Ruido de tráfico rodado.

Mapa de niveles sonoros, L_{noche} - Ruido de tráfico rodado.

Mapa de niveles sonoros, L_{den} - Ruido total.

En cuanto a los planes de acción del Ayuntamiento de Valladolid, se han centrado en 10 líneas generales de actuación en función de los focos de ruido y del tipo de actividad considerados. Los epígrafes que entendemos pueden afectar al entorno de la catedral son:

Planes de acción destinados al tráfico de vehículos y ciclomotores. Puesto que el tráfico es la principal fuente de ruido del municipio de Valladolid, es la que recoge el mayor número de medidas específicas para su reducción.

Las medidas que inicialmente se proponen en el plan de acción se dirigen a los tres campos que intervienen en la propagación del ruido en exterior (fuente, medio y receptor).

En cuanto a las acciones propuestas en el plan de acción, que afectan principalmente al emisor o vehículo, consisten en incrementar los controles de las emisiones acústicas mediante inspecciones periódicas; instalar pavimentos fonoabsorbentes en las nuevas calles; controlar el límite de la velocidad de los vehículos por el casco urbano, implantando pasos de cebra elevados, aumentar el número de radares e incrementar los controles; peatonalizar determinadas calles; ampliar aceras y redistribuir el tráfico al tiempo que se mejora el transporte público; ofrecer aparcamientos disuasorios y fomentar el uso del coche compartido.

¹⁰ L_{den} O nivel equivalente, Día, Tarde, Noche.

De las acciones propuestas por el plan sobre el medio de propagación cabe destacar el incremento del espacio entre el emisor y el receptor mediante espacios verdes, ampliación de aceras y la creación de desniveles.

Exigir el cumplimiento del CTE DB HR “Protección frente al ruido” en lo relativo a las actuaciones sobre el receptor así como la mejora del aislamiento acústico de las fachadas de los edificios existentes. En este caso al tratarse de un BIC, la catedral no se ve afectada, puesto que en caso de intervención, el proyecto de restauración tendrá que pasar los controles establecidos por la Ley de Patrimonio¹¹.

En la actualidad la actividad de la catedral no es exclusivamente el culto, pues a parte de las visitas al Museo Diocesano y al Templo, también se realizan exposiciones¹² y periódicamente conciertos de órgano. Es por lo que entendemos que las actividades de ocio no la afectan directamente a estas, teniendo poca o escasa coincidencia de horarios. No obstante, el ocio, sigue siendo la principal causa de las denuncias ciudadanas en materia de ruido. En este caso, el plan se propone un mayor control de las licencias de actividad y de los horarios, así como la declaración de zonas ZAS (Zonas Acústicamente Saturadas) y la realización de campañas de colaboración y sensibilización, para mejorar las condiciones acústicas de estas zonas.

En cuanto a los festejos, ocasiones especiales, las propuestas del plan de acción son las de otorgar las autorizaciones y licencias para estas actividades con criterios acústicos, el control y seguimiento de las mismas autorizadas en la vía pública así como la limitación y aislamiento de los equipos.

Estas actuaciones propuestas en el plan de acción pueden mejorar el entorno acústico de la catedral, pero como hemos comentado, no afectan a su actividad principal sustancialmente, puesto que analizando los resultados del mapa estratégico de ruido podemos comprobar que el monumento se encuentra dentro de una gran manzana delimitada por las calles López Gómez, (S.E.) Núñez de Arce, (S.O.) Arzobispo Gandasegui (N.E.) y Angustias (N.O.) con unos niveles de presión sonora entre 70 y 75 dB(A) debido al tráfico, pero parte de su fachada a la Plaza de Portugalete, la principal a c/ Arribas y la fachada S.E., a c/ Cardenal Cos, hasta la Plaza de la

¹¹ -Ver Ley 12/2002, de 11 de julio, de Patrimonio Cultural de Castilla y León.

¹² - En marzo de 2013, una de fotografías en la Capilla de la Magdalena.

Universidad, tienen un nivel de $L_{\text{día}}$ ó L_{total} , inferior a 55dB(A). Límites que coinciden sensiblemente con los de la parcela de la Cuarta Colegiata o Catedral Herreriana, objeto de esta memoria, el resto del complejo catedralicio, con fachadas a Plaza de la Universidad, c/ Arzobispo Gandasegui y Plaza de Portugalete, presenta unos niveles, entre 55 y 65 dB(A). Plano A.03.2

Comparamos los niveles de presión de ruido de fondo en dB, que el programa incorpora por defecto con los realizados en otros estudios en la tabla 2.1.

Bandas de octava (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
CATED. DE SEVILLA ¹³ (dB)	47	43	40	35	28	22
MONAST. S. CREUS ¹⁴ (dB)	30,3	29,1	29,7	23,1	17,8	20,6
I. CONV. J. de LA F. ¹⁵ (dB)	40	35	33	29	23	25
CATT-Acoustic ¹⁶ (dB)	43	38	32	28	25	23

Tabla 2.1. Ruido de fondo por bandas de octava.

Para terminar este apartado, podemos comentar que, a la vista del mapa estratégico de ruido de Valladolid estudiado (2008), los niveles de L_{den} , total del entorno de protección (plano A.03.2) no plantean en la actualidad problemas acústicos a la actividad principal del templo, ni a los conciertos de órgano que se celebran, puesto que los niveles exteriores del mapa en las fachadas más importantes no superan los 55 dB(A), antes de que el Ayuntamiento aplique o implante los programas de lucha contra el ruido en la ciudad. En cuanto al ruido de fondo, mantenemos los niveles predeterminados por el programa (NC-25)¹⁷ al no tener datos suficientes para modificarlos y mantener un criterio lógico.

¹³.- Zamarreño, T. Algaba, J. Parámetros acústicos medidos en la catedral de Sevilla.

¹⁴.- González, G. Esteve, J. Daumal, F. La voz de los Monasterios a examen: Santos Creus y Santa María de Poblet.

¹⁵.- Muñoz, S. Zamarreño, T. Sendra, J.J. Navarro, J. Rehabilitación de un espacio eclesial como espacio escénico.

¹⁶.- Niveles de presión en dB, que no se han modificado.

¹⁷.- “Noise Criteria” Curvas de referencia de niveles de ruido máximo recomendable. En esta ocasión se cumple con NC-25 por que los niveles de ruido de fondo considerados, en cada banda de octava. están por debajo de los de la curva NC-25.

2.3.- PARÁMETROS ARQUITECTÓNICOS

El estudio de los datos arquitectónicos de una catedral se puede enfocar desde muchos puntos de vista, dependiendo del objetivo perseguido. Fernando Chueca Goitia, estudio las proporciones para realizar un anteproyecto arquitectónico, Elesio Gatón, los ha estudiado y calculado (realizado un levantamiento completo, incluso el topográfico), para la redacción del “Plan Director” y resto de proyectos de restauración, si bien desde el punto de vista de la simulación acústica todavía no conocemos estos datos ni los tenemos recogidos en un estudio concreto. No obstante, existen suficientes proyectos, estudios y publicaciones como para poder recopilarlos sin problemas, como se ha comentado.

Los parámetros arquitectónicos que buscamos son los que nos van a configurar físicamente el recinto y se pueden definir como los que definen el volumen a estudiar. Normalmente estos datos se resumen en una tabla que nos permite, con un vistazo, tener toda la información geométrica más importante de la sala, en este caso la tabla 2.2.

El principal parámetro acústico que caracteriza una sala es el tiempo de reverberación (TR), definido inicialmente por Wallace Clement Sabine, relacionando el volumen total del recinto con las superficies de absorción de todos los elementos de la sala. Que estudiaremos con más detenimiento en el siguiente punto, “Acabados interiores”.

De todos los parámetros arquitectónicos posibles que podemos recopilar y calcular, en esta memoria vamos a trabajar con los 10 siguientes: el volumen total del recinto, las superficies de los paramentos, el área de la audiencia, el aforo sentado (estimado para una situación concreta), las longitudes de naves, la anchura de los tres tipos de naves, la altura de naves, el volumen/plaza, el volumen/área de audiencia y el área de audiencia/plaza, puesto que entendemos que con estos se define suficientemente el espacio a caracterizar. Estos datos los recogeremos en la tabla 2.2. Tabla inspirada en el trabajo de Sendra, J. et al, que publican en su libro¹⁸, “La acústica de las Iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla”, ajustándola a nuestro caso concreto.

¹⁸.- Universidad de Sevilla. 1999

Entendemos que la zona de audiencia se puede modificar en función del acto y del equipo que se utilice, e incluso se puede suponer un aforo de pie, extremos que no estudiamos.

La mayoría de los datos primarios nos los proporciona directamente el programa de simulación *CATT*, (volumen total, superficie total y área de audiencia) una vez ajustado el modelo tridimensional, el resto los hemos calculado con el programa de dibujo *AutoCAD*, como distancias y superficies.

	Unid.	NAVE CENTRAL	NAVES LATERALES	CAPILLAS	TOTAL
Volumen:	m ³ .	36.630,00	15.170,00	5.050,00	56.850,00
Sup. paramentos:	m ² .	-	-	-	16.692,00
Área de audiencia:	m ² .	428	142	-	570,00
Aforo (sentado):	Pers.	856	284	-	1.140,00
Longitudes de naves:	m.	47,60	51,30	11,10	68,80 ¹⁹
Anchura de naves:	m.	13,90	8,90	5,60	57,40
Altura de naves:	m.	31,00	18,00	9,20	31,00
Volumen/plaza:	M ³ /pers	37,85	53,79	-	46,16
Vol./área audiencia:	M ³ /m ² .	75,70	106,80	-	92,32

Tabla 2.2. Parámetros arquitectónicos considerados y ocupación propuesta para la geometría del estado actual.

El número de personas por m² de audiencia propuesto por Neufert, en una iglesia católica va de 0,43 a 0,52 m², sin contar la superficie de pasillos, en esta ocasión se ha tomado 0,50 m² por persona.

Estos parámetros arquitectónicos son básicos para entender los cálculos de los parámetros acústicos de la catedral, pero también nos sirven para clasificar y comparar objetivamente nuestro recinto con otras iglesias similares.

¹⁹ -Incluido el presbiterio.

2.4.- ACABADOS INTERIORES

En palabras de Fernando Chueca Gotilla²⁰. “El interior, en síntesis, todo lo confía al efecto de las masas ciclópeas desnudas, que provocan en los espectadores sentimientos de fuerza y eternidad, y al de las proporciones, que despiertan el alma a una celeste música que parece cantada por ángeles graves y severos”. Este comentario es un buen resumen de lo que nos encontramos en el interior de la catedral de Valladolid.



Figura 2.9. Vista de la nave mayor hacia el presbiterio.

En la mayoría de los trabajos de simulación acústica publicados, se hace una amplia referencia a los materiales de acabado y a los coeficientes utilizados en la simulación, si bien, cuando se han realizado mediciones *in situ*, éstos se corrigen para ajustar los resultados de la simulación a los de la medición.

Inicialmente haremos una descripción de los mismos, que nos servirá para saber qué número de capas de dibujo tenemos que crear en *CAD*, y poder generar una tabla de materiales con los coeficientes de absorción considerados en el cálculo.

²⁰.- La Catedral de Valladolid, pp.117.



Figura 2.10. Bóveda de cañón de nave principal.

Los acabados interiores de la catedral se pueden describir de la siguiente forma: el suelo es sensiblemente horizontal, de laudas de piedra caliza²¹, en la nave mayor y menores (Epístola y Evangelio); teniendo losetas cerámicas y piedra en la capilla de San Fernando²² y solamente losetas cerámicas en las capillas de la Magdalena, San Pedro y San Miguel; Tarima de madera en el resto, Capillas de San José, Nuestra Señora del Sagrario, Nuestra Señora de los Dolores y la de San Juan Bautista. Los paramentos verticales de la catedral son principalmente de sillería de piedra caliza de páramo, sin revestimientos, exceptuando el cierre provisional de las naves, mayor y menores que se ha ejecutado con ladrillo, acabado al interior con un enfoscado de mortero de cemento decorado, imitando piedra, ejecutado en 1963. Las bóvedas de piedra están acabadas en yeso con una mínima decoración de puntas de diamante. El resto de acabados que vamos a tener en cuenta en este trabajo de simulación son los retablos, puesto que tenemos uno por capilla más el retablo mayor²³ y las puertas de madera. De estos elementos vamos a estudiar sus acabados y su coeficiente de absorción (α).

El programa de simulación acústica “*CATTacoustic*” cuenta con una extensa librería de materiales que será la que principalmente se utilice en nuestra simulación (*Karlen, Petresen y Lawrence*), complementada con la de otros estudios en aquellos materiales o acabados no incluidos en la librería del

²¹ - La piedra caliza de páramo, utilizada para la construcción de la catedral procede de 8 canteras distintas.

²² - El nombre y la ubicación de todas las capillas hornacinas están reflejado en el plano de planta. A.03.3

²³ - Del escultor Francés perteneciente a la escuela Castellana, Juan de Juni. (1506-1577)

programa, por la especificidad, como los retablos, estos coeficientes en % están resumidos en la tabla 2.3.

MATERIALES	BANDAS DE OCTAVA (Hz.)						FUENTE
	125	250	500	1000	2000	4000	
Suelo de piedra caliza.	13	13	13	14	16	16	Alonso, A. ²⁴ .
Suelo de losetas cerámicas	2	2	2	2	3	3	Karlen.
Tarima de madera	14	10	6	8	10	10	Petersen.
Paramentos verticales de caliza	13	13	13	14	16	16	Alonso, A.
Enfoscado de mortero de cemento	3	3	6	9	4	6	ACADEM ²⁵ .
Las bóvedas de yeso	20	15	10	8	4	2	Lawrence.
Retablos	12	12	15	15	18	18	Alvarez, L. ²⁶
Puertas de madera	14	10	6	8	10	10	Petersen.
Cortinas del presbiterio	6	10	38	63	70	73	Karlen.
Audiencia	26	46	87	99	99	99	Karlen.
Órgano	12	14	16	16	16	16	Alvarez, L.

Tabla 2.3. Coeficientes de absorción considerados por bandas de octava y fuente.

La importancia de los materiales y acabados interiores en un recinto, viene dada porqué de los coeficientes de absorción de estos, dependen los parámetros acústicos más importantes de la sala y en el modelo virtual los podemos ajustar por bandas de octava, para su calibración (Álvarez, L. 2011).

En el supuesto de una restauración y dependiendo del resultado que pretendamos conseguir en la sala, daremos más protagonismo a unos materiales u otros. Como sabemos, los materiales absorbentes son utilizados para minimizar o reducir la reverberación. En el caso de los materiales reflectantes son aconsejados para aumentar las primeras reflexiones, si estas puedan dirigirse a la zona de la audiencia que interese.

Acabado	Área, m2	% Área.
PAREDESCALIZA	7.053,80	42,30
TECHOYESO	5.675,60	34,00
PAVIMENTOPIEDRA	2.239,50	13,40
ABSOAUDIENCIA	758,20	4,50
TERCIOPELO	329,80	2,00
RETABLOS	288,80	1,70
PAVI_MADERA	257,30	1,50
PUER_MADERA	88,60	0,50

Tabla 2.4. Superficies y porcentajes sobre el total, de las superiores al 0,50 %(CATT).

²⁴.- Alonso, A. *et al.* 2012

²⁵.- www.farq.edu.uy/joomla/images/acustico/Tablas.

²⁶.- Alvarez, L. *et al* 2011

3.- SIMULACIÓN ACÚSTICA

3.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN

Los primeros trabajos de los que tenemos noticias, sobre la simulación acústica, comienzan en los años 30 Spandöck crea el primer sistema del modelado de un campo sonoro, basado en señales ultrasónicas, en un modelo a escala y un equipo de grabación. Es a mediados de los años 40, con la construcción de los primeros computadores de propósito general como “*EINAC*¹”, cuando se sentaron las bases de la evolución en el campo de la simulación. Como es lógico, el proceso de simulación acústica esta directamente relacionado con los programas y ordenadores que se utilizan en el proceso. En la actualidad el desarrollo de las herramientas informáticas de simulación o predicción acústica evoluciona muy rápido, al tiempo que lo hacen todos los elementos que se necesitan para realizar los cálculos. Los primeros programas de simulación empezaron a desarrollarse en 1967, pudiendo a día de hoy realizar simulaciones muy cercanas a la realidad (Zamarreño, T. et al. 2011).

En la simulación se emplean modelos matemáticos de la realidad para encontrar soluciones analíticas a las ecuaciones que gobiernan los procesos que se estudian y de alguno de los cuales se tienen datos de observaciones reales, con los que podemos comparar los resultados. El objetivo es validar los procesos y poder predecir el comportamiento del sistema, cambiando algunos de los parámetros y condiciones iniciales, de forma sistemática.

La empresa que desarrolla el programa de simulación que vamos a utilizar en este trabajo empezó en campo de la ingeniería eléctrica, implicándose parcialmente con la acústica desde 1981. Inicialmente centraba su trabajo en el diseño, decoración e iluminación de teatros y espectáculos, pero desde 1988, *CATT*, (*Computer Arded Theatre Technique*), se ha centrado en el desarrollo de software de simulación de acústica de salas. En 1990 incorporan los procesos de auralización o post-procesado binaural, continuando su desarrollo hasta la actualidad (*CATT*. Manual).

¹.- Acrónimo de *Electronic Numerical Integrator And Computer* (computador e Integrador Numérico Electrónico), utilizado por el Laboratorio de Investigación Balística del ejército de los Estados Unidos. La ENIAC fue construida por la Universidad de Pensilvania por John Presper Eckert y John William Mauchly, ocupaba una superficie de 167 m² y operaba con un total de de 17.468 válvulas electrónicas o tubos de vacío que a su vez permitían realizar cerca de 500 sumas y 300 multiplicaciones por segundo. Su peso era de 27 toneladas.

En relación con el inicio de los estudios, de la acústica de los templos el primero que hemos localizado es el de A.C. Raes, Sacerdote, en su trabajo "*Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas*" de 1953, también Shankland, R. S. y Shankland, H. K. en "*Acoustic of St. Peter's and patriarchal basilicas in Rome*" 1971 continúan el trabajo. Tzekakis en 1979 estudia varias iglesias en Tesalónica. Freat, R. "*Reverberation in Spanish, English, and French churches*," 1975 estudia las iglesias europeas occidentales. Desarnaulds, V. Eggenschwiler, K. Bossoney, S. en "*Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen*" estudio de más de 150 iglesias Suizas. También en 1999 el portugués Carvalho, A. P. O. EN "*Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches*," estudia la acústica de las iglesias portuguesas. Para terminar con esta relación de autores y equipos que investigan la acústica de las iglesias lo hacemos con el equipo encabezado por Cirillo, E., que han estudiado la acústica de diferentes topologías de iglesias católicas italianas. (Álvarez. L. et al. 2011).

3.2. EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

De los numerosos programas de simulación acústica que existen en el mercado, *CATT-Acoustic*, *Odón*, *Ease*, *SLAB*, *EVERTTims*, etc. vamos a trabajar con ***CATT-Acoustic, V8. 0b***.

El motivo de trabajar con este programa es la facilidad para la obtención de una versión “demo” del mismo y que, la practica de la asignatura “Acústica de Salas” la hemos realizado con el, con lo que la primera aproximación la tenemos salvada. Otro motivo importante para trabajar con esta versión (***V8. 0b***.) es que es lo suficientemente potente, como para procesar los modelos virtuales obtenidos en este capítulo y proporcionarnos todos los datos de los parámetros que buscamos para caracterizar acústicamente la catedral.

En este apartado pretendemos presentar la herramienta que nos va a facilitar los datos acústicos que buscamos y conocer qué pasos necesitamos dar para empezar a trabajar, sin pretender profundizar en el manejo del programa, puesto que somos conscientes que dominar un programa tan complejo completamente requiere muchos años de práctica, y una actualización constante con las nuevas versiones.

El software “*CATT- Acoustic*” combina características del trazado especular de conos, con el trazado de rayos estándar y el algoritmo de las fuentes imagen.

Para que el programa *CATT*, pueda empezar a trabajar hay que partir de un modelo virtual con unas características específicas en formato de texto y con estructura jerárquica, que el programa pueda procesar, estas características especiales son las que comentamos en el apartado de modelización.

Los archivos básicos que necesitamos para una sesión de *CATT* son tres:

- El primero la geometría de la sala, objetivo de este capítulo, la cual tenemos que describir con un formato de texto, como se ha comentado (archivos que incluiremos en el CD, debido a su extensión) así como los coeficientes de absorción y de difusión de los materiales; “*MASTER.GEO*”.

- El segundo archivo que necesitamos definir son las fuentes, tanto su ubicación como características, en nuestro caso trabajaremos con tres ubicaciones o supuestos de las mismas características (A0, A1, y A2); “*SRC.LOC*”.
- El último archivo, el más fácil de generar, que tenemos que definir antes de empezar a trabajar con el programa, es el número y la ubicación de los receptores representativos de la sala; “*REC.LOC*” que fijaremos más adelante.

Definidos estos tres archivos o ficheros podemos comenzar un proyecto con *CATT-Acoustic*. En cualquier caso, independientemente de cómo se hayan generado los datos de estos ficheros, sabemos que los podemos modificar y ajustar una vez estemos trabajando con *CATT*, para subsanar errores de la geometría o para optimizar las fuentes y los receptores.

Otra opción de la que dispone este programa es el “*POST PROCESSING*” pero que no vamos a considerar en este trabajo, opción que permite la realización auralizaciones.

En el anexo 2 de esta memoria, completamos este apartado, haciendo un repaso del proceso seguido en una sesión completa de trabajo y comentando los puntos que nos parecen más interesantes.

3.3. PROCESO DE MODELIZACIÓN

3.3.1 PROCESO DE MODELIZACIÓN DEL ESTADO ACTUAL

En esta ocasión entendemos por modelización; la ejecución de un modelo virtual en 3D de la geometría de la sala (simplificación el modelo real), el cual nos permita trabajar con un programa de simulación acústica.

Del estudio del estilo arquitectónico del interior de la catedral, podemos comentar, que es el corintio y “esta proporcionado de la siguiente forma: basa, tres pies² y medio (medio diámetro, un modulo); fuste, 52 pies y medio; capitel sin ábaco, siete pies (dos módulos); ábaco de capitel, un pie. Suma total de la columna, 64 pies. Entablamento 14 pies y un quinto de pie. Estas medidas se refieren al orden ejecutado” (Chueca, F. 1947). Con pilares de lado envolvente de 13 pies, puesto que tienen 3 soluciones distintas dependiendo de la cara que se trate.

La modelización es un proceso sencillo, pero muy laborioso, que nos va a condicionar los resultados de la simulación. Algunos autores ajustan o calibran el modelo acústico con las mediciones complementarias realizadas *in situ* (Álvarez, L. et al. 2011). Para la medición *in situ* se sigue la metodología de la norma internacional UNE-EN-ISO, 3382-1 y 2. ACUSTICA “Medición de parámetros acústicos en recintos”. En el caso de la simulación virtual, de una sala, no tenemos una norma internacional que regule el proceso o proponga una metodología. Con lo único que contamos es con la documentación previa y los condicionantes de los programas informáticos especializados en el tema.

Para que los resultados del trabajo de modelización sean satisfactorios, es imprescindible una planificación previa, lógicamente, esta planificación es más importante cuanto más grande sea el proyecto de modelización, sabemos qué todo el tiempo que se emplee en preparar el trabajo, será rentabilizado sustancialmente. Esto es debido a la gran cantidad de datos que se manejan y la interdependencia de los mismos. Cualquier error en la ejecución del modelo, se arrastra por todo el proceso, generando fallos de funcionamiento del simulador, retrasos e incluso, en el peor de los casos, impidiendo que el programa facilite los parámetros requeridos para la caracterización del recinto.

². - El pie castellano es la unidad de medida empleada en su traza (1580) y en su replanteo (1 pie castellano = 27,86 centímetros).

En este capítulo comentamos, a grandes rasgos, el proceso de modelización de la inconclusa catedral de Valladolid, en su estado actual. En un segundo proceso incluiremos el coro antiguo o coro bajo desaparecido, los pasos no son los mismos, puesto que partimos de un primer modelo ya cerrado. En el primer caso hemos realizado un modelo con el programa de dibujo *AutoCAD* versión 2010 (español), pero los archivos generados los guardaremos en la versión 2000, para que se pueda leer por esta y las versiones posteriores a esta y de simulación acústica "*CATT-Acoustic v8.0b*".

La documentación más destacada con la que se ha contado para la realización del modelo 3D, es la siguiente:

- .- un levantamiento topográfico incluido en la "1ª Fase del Plan Director" 1995,
- .- la documentación gráfica de las dos fases del "Plan Director" con planos a escala 1/100 y 1/400 (1995-1996),
- .- el trabajo de Fernando Chueca Goitia, 1947, que realizó para presentarse el concurso a nivel de anteproyecto "El cierre de la catedral de Valladolid"³,
- .- informe de la restauración del atrio, 1983⁴.

También se ha realizado la comprobación de las cotas más importantes, con un distanciómetro láser (Leica DISTOTM A5) y un flexímetro o flexómetro (MEDID de 5m, de hoja metálica).

Antes de empezar a dibujar, y puesto que no existe ninguna metodología específica normalizada, como hemos comentado, y muchos caminos para obtener el mismo objetivo (dependiendo de las herramientas y de la habilidad del autor), optamos por plantear un sólido en 3D del medio, que nos sirva de base para el modelo virtual.

Otro punto imprescindible, para poder realizar este trabajo, es conocer los requerimientos del dibujo en 3D para que este archivo de *AutoCAD* pueda transformarse en archivo de texto y leerse desde el *CATT-Acoustics*, donde también se pueden ejecutar modificaciones de la geometría de la sala. Las premisas más importantes que tenemos a cumplir para poder obtener el archivo de texto deseado son principalmente dos:

³.- En 1942 se celebró un concurso nacional de arquitectura, a nivel de anteproyecto para solucionar el cierre de la catedral de Valladolid con el título "Anteproyecto de solución del crucero de la Catedral de Valladolid y urbanización del espacio que la rodea" concediendo el primer premio, que no se ha ejecutado, a Carlos Miguel y Manuel Martínez Chumillas.

⁴.- Trabajo en el que se hace referencia a la cimentación y restos de la tercera Colegiata, cuya cimentación se aprovecha para la cuarta, por imposición del Cabildo y aceptación del arquitecto Juan de Herrera.

- La primera es que todas las superficies sean rectas, *CATT* no admite superficies alabeadas ni curvas.
- La segunda es que todos los elementos o planos tienen que ser “caras 3D”.

El programa (*CAD*) tiene más opciones para dibujar en 3D, como superficies u objetos 3D, polilíneas 3D, sólidos 3D, regiones, etc, opciones que en esta ocasión vamos a utilizar en pasos intermedios a la hora de ejecutar el “molde”, pero que no pueden aparecer en el dibujo final, puesto que si dentro de los planos seleccionados (caras 3D) aparece o se incluye un punto, una línea o cualquier otro elemento, la transformación no se produce.

La orden “3D caras”, o superficie de dibujo exclusiva del modelo a transformar en texto, una vez cargadas las carpetas de “*Autolisp*” en *Auto-CAD*, tiene unas características específicas que tenemos que conocer y pueden ayudarnos a simplificar y optimizar el tiempo empleado en la generación del modelo, como son:

- a) cada cara creada se convierte en un objeto independiente y por ello es posible aplicarle diferentes transformaciones, tales como la modificación de los pinzamientos y extrusiones.
- b) el número máximo de vértices de es de cuatro, hay que tener cuidado de no duplicarlos⁵.
- c) a la hora de crear esta superficie el sentido en el cual realizamos los *clis*, ya sean horarios o antihorarios varían los resultados del plano, puesto que estos en *CATT*, tienen distintas propiedades en cada una de sus lados, o mejor dicho, solo tienen propiedades acústicas en una de sus caras. (*CATT*. Manual).

El proceso seguido en este caso para la obtención del primer modelo arquitectónico, al que llamamos “molde” (sólido 3D), es el siguiente:

Después de estudiar la documentación grafica, con la intención de simplificar el trabajo, se comprueba que en la planta se puede considerar un eje de

⁵.- Si duplicamos un vértice, a la hora de la simulación en *CATT* nos va a dar un error que tenemos que corregir en la GEOMETRIA del modelo.

simetría longitudinal. Con lo que reduciremos la carga del dibujo sustancialmente⁶. Entendemos que las pequeñas diferencias constructivas existentes en los cierres⁷ de la cabecera de las naves laterales o menores no afectan sustancialmente a las condiciones acústicas de la zona de audiencia. Otro detalle que destacamos en la planta de bóvedas (figura 3.1, planta bóvedas, plano G-06, de la 2ª Fase del Plan Director) es que las naves menores están cubiertas por módulos de bóvedas de crucería, separados entre sí por sus correspondientes arcos fajones y de la nave mayor por los formeros, todos de medio punto con el mismo radio (16 pies castellanos).

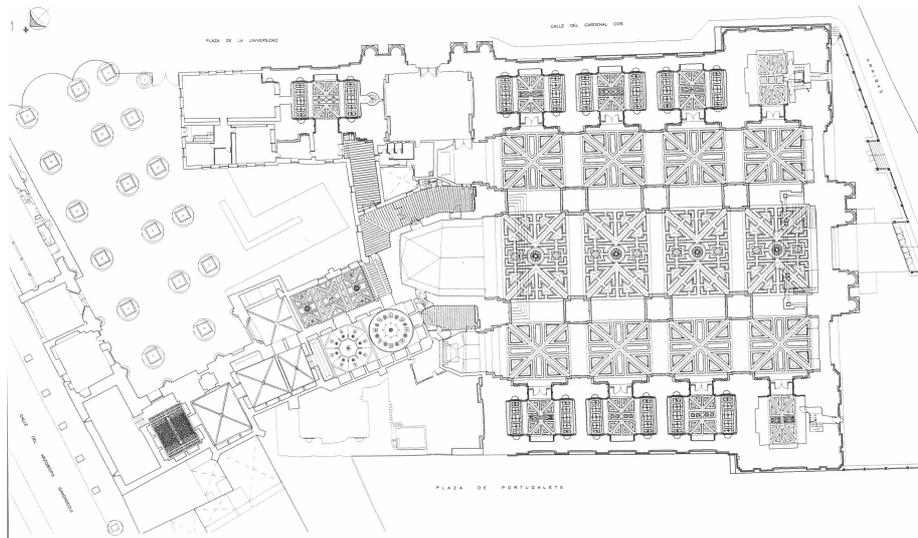


Figura 3.1.- Planta bóvedas (Plan Director 2ª fase. 1996)

También se puede apreciar en esta planta que las 3 capillas hornacina ó capillas laterales entre contrafuertes tienen las mismas dimensiones, distintas a las de las capillas de las torres. (figura. 3.2)

Fernando Chueca Goitia, describe magníficamente la composición de esta planta y sus proporciones, dándonos la clave de la misma:

“La ordenación transversal de la planta está formada por la repetición de un modulo de 10 pies que corresponde al núcleo del pilar, es decir, a la anchura de los arcos formeros principales. Nave mayor, cinco partes, 50 pies; nave menor, tres partes, 30 pies (diferencia de dos pies pues mide 32); grueso de

⁶.- El programa CATT-Acoustic tiene la opción de duplicar la geometría del modelo, con una orden de simetría, pero en esta ocasión decidimos trabajar con AutoCAD, puesto que tenemos más práctica con este programa.

⁷.- Cierres provisionales realizados en 1962, proyecto de Garitazo Nieto, Director de Bellas Artes, obras dirigidas por el arquitecto, Anselmo Arenillas Álvarez.

muro de capillas hornacinas con pilastras, una parte, 10 pies; hornacina, dos partes, 20 pies. La luz, por lo tanto, de los grandes arcos formeros es también de 32 pies. Luego la anchura total del templo la forman 19 partes (190 pies aproximadamente, 205 en realidad). Por esta modulación, que para ser más exacta exigiría un valor entre 10 y 11 pies para modulo (II $\frac{1}{2}$ mide exactamente el grueso del formero), vemos cuán admirablemente se forma la planta dupla total de la catedral de 204 x 411 pies, que es lo que mide el interior del templo”.



Figura 3.2.- Calco planta baja, estado actual.

Una vez analizada la planta y siendo conscientes de los problemas, en fases posteriores que nos genera el trabajar con módulos independientes, de posibles fugas de rayos que tendremos cuando acoplemos estos, optamos por dividir y ejecutar por separado los siguientes elementos o módulos:

- a) $\frac{1}{2}$ Nave central,
- b) $\frac{1}{2}$ cierre de la nave central o presbiterio,
- c) modulo de nave lateral,
- d) cierre de nave lateral,
- e) capillas hornacinas,
- f) capilla torre,
- g) acceso y coro actual.

Para ejecutar el primer “molde” de cada una de estas 7 partes, en las que hemos dividido el estado actual de la catedral, en *CAD* (2010), comenzamos

por estudiar y trazar un croquis, a mano, específico de cada una de ellas, con objeto de poder visualizar todos los datos que necesitemos al mismo tiempo, o por lo menos, tenerlos en el mismo cuaderno y no tener que manejar toda la documentación⁸ a la hora de sentarnos delante del ordenador a dibujar. En las figuras 3.3 y 3.4 adjuntamos unos ejemplos de estos croquis en nuestro cuaderno de trabajo.

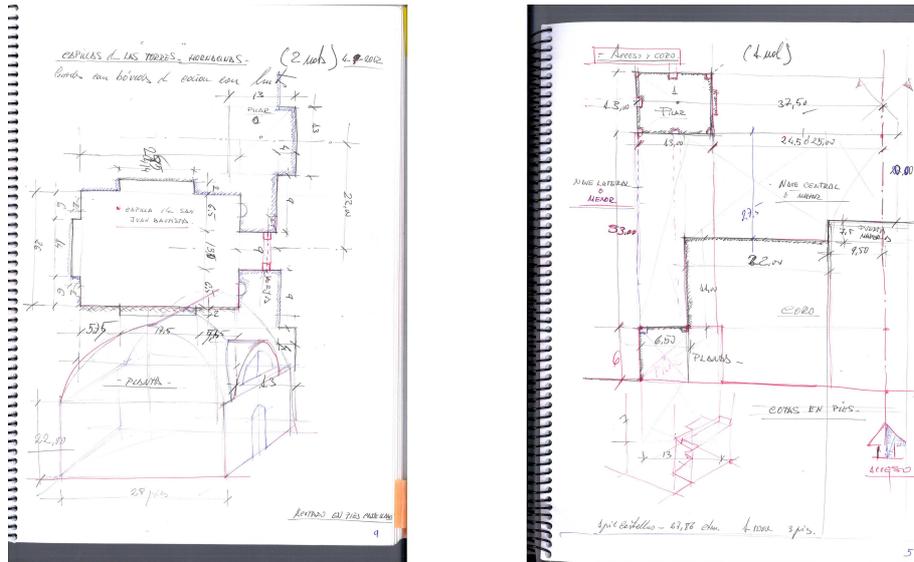


Figura 3.3.- Croquis de trabajo, planta capilla torre (f) y acceso (g).

Las cotas empleadas para realizar estos primeros croquis, se han sacado de las copias de los planos originales publicados en el estudio de Fernando Chueca Goitia, 1947, de los planos de la “1ª Fase del Plan Director” (planta a escala 1:100 y las dos secciones, longitudinal y transversal también a 1:100) y del resto de documentación citada, contrastando dicha información con las comprobaciones *in situ*, y dando siempre preferencia a las tomadas *in situ*, si bien, las diferencias no son sustanciales.

Otro detalle que nos ayuda a entender el monumento y simplifica mucho la realización de estos primeros croquis, es la escala. En esta fase decidimos trabajar con “pies castellanos” (1 pie = 0,2786 m) puesto que los planos originales están trazados con esta unidad y Fernando Chueca Goitia, también la utiliza, para explicar la proporción de la traza original de Juan de Herrera.

⁸.- Los planos más utilizados a escala 1:100 necesitan un A0. (111 x 84 cm.)

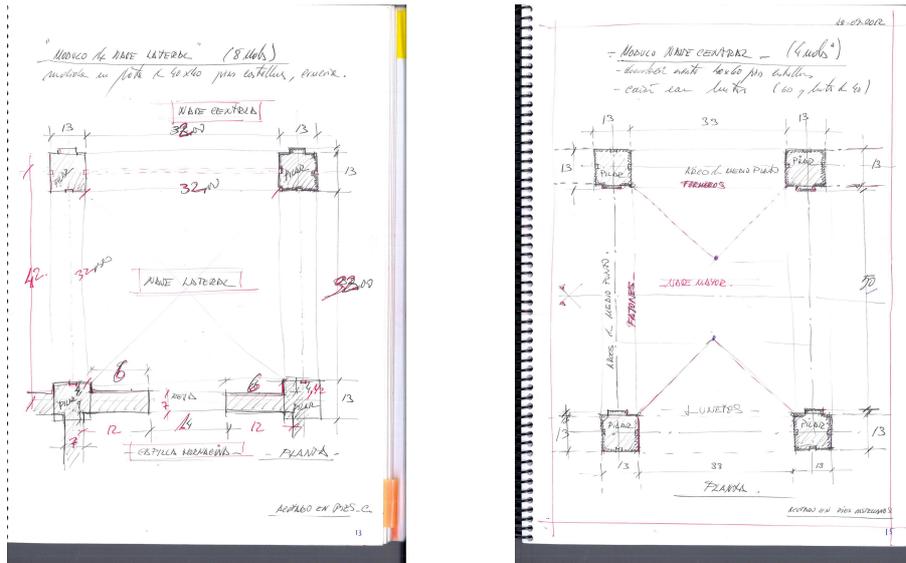


Figura 3.4.- Croquis iniciales planta nave lateral (c) y nave mayor (a).

Debiendo transformar las cotas tomadas *in situ*, las obtenidas del levantamiento topográfico y las de la documentación grafica del “Pan Director”, inicialmente de metros a pies y una vez realizado el modelo, escalarlo o volverlo a transformar de pies a metros, esta operación de escalado en *CAD* es muy sencilla y rápida.

En esta fase del trabajo es importante decidir las primeras simplificaciones, puesto que conocemos algunas de las limitaciones de *CATT*, podemos eliminar las hornacinas, acanaladuras de la fábrica y demás recursos arquitectónicos del estilo corintio del interior, sabiendo que posteriormente concretaremos con el modelo acústico o simplificado (Planells, A. et al, 2011⁹). El problema es encontrar un equilibrio entre los dos modelos. En el primer “molde” con *AutoCAD* podemos definir cuantos detalles queremos, puesto que disponemos de muchas más herramientas de dibujo que en el programa *CATT-Acoustic*. Sin perder de vista el objetivo parcial de este apartado (que no es otro que el de obtener el modelo acústico o geometría del espacio interior de la catedral) y sabiendo que cuantos más planos utilicemos en el modelo acústico¹⁰, más tiempo empleara para el cálculo, más laboriosa y compleja será su corrección.

También creemos que es importante tener en cuenta antes de empezar a dibujar, que debemos disponer o realizar un listado de materiales y acabados

⁹- ISVA. 2011, Elaboración de modelos para el estudio acústico en entornos virtuales.

¹⁰- El programa tiene un límite de 5000 planos, pero aconsejan entre 100 y 500 para una mayor eficiencia de la sesión (*CATT*. Manual).

interiores, (apartado 2.4) puesto que este trabajo previo nos va a facilitar mucho las cosas a la hora de seleccionar los planos por capas para su transformación en archivo de texto con *AUTOLISP*. Como sabemos, los parámetros básicos que condiciona el comportamiento acústico de un recinto son el volumen y el coeficiente de absorción de los materiales. Este listado previo de materiales nos sirve para crear, en nuestro proyecto (*CAD*), una capa de dibujo específica para cada material y acabado diferente, puesto que a la hora de transformar los archivos *CAD* en *CATT* (dibujo en texto) simplifica la selección de los planos con los mismos coeficientes, puesto que *CATT* asigna a cada grupo de planos su absorción específica.

Sin olvidar, que en cualquier momento del proceso podemos cambiar las propiedades acústicas de un determinado plano o grupo de planos y ajustar sus coeficientes de absorción por bandas de octava. El listado de capas utilizado en este trabajo es el de la figura 3.5.

Nombre	A...	Inutili...	B...	Color	Tipo línea	Grosor de lí...	Estilo d...	I...
0				Blanco	Continuous	---	Por...fecto Color_7	
1_BOVEDAS YESO				68	Continuous	---	Por...fecto Color_68	
1_CAP_HOR_yeso				30	Continuous	---	Por...fecto Color_30	
1_CIERRE CRUCERO				Cián	Continuous	---	Por...fecto Color_4	
1_NAVES_LAT_yeso				94	Continuous	---	Por...fecto Color_94	
1_TORR_BOV_yeso				34	Continuous	---	Por...fecto Color_34	
10_RECECTORES				230	Continuous	---	Por...fecto Color_230	
11_retablos				52	Continuous	---	Por...fecto Color_52	
12_LOSETA_cerámica				200	Continuous	---	Por...fecto Color_200	
2_PAVIMENTO_caliza				103	Continuous	---	Por...fecto Color_103	
3_PAV_MADERA				46	Continuous	---	Por...fecto Color_46	
4_PUERTA_madera				85	Continuous	---	Por...fecto Color_85	
5_CORTINAS				Magenta	Continuous	---	Por...fecto Color_6	
6_CIERRES_P_CALIZA				Rojo	Continuous	---	Por...fecto Color_1	
6_ENTABLAMENTO				215	Continuous	---	Por...fecto Color_215	
6_PARAM...S_PIEDRA				181	Continuous	---	Por...fecto Color_181	
7_CAP_HORNACINA				46	Continuous	---	Por...fecto Color_46	
7_CAP_LATERAL				24	Continuous	---	Por...fecto Color_24	
8_AUDIENCIA				42	Continuous	---	Por...fecto Color_42	
9_ENFOSCADO_MC				21	Continuous	---	Por...fecto Color_21	
ASHADE				Blanco	Continuous	---	Por...fecto Color_7	
Delpoints				Blanco	Continuous	---	Por...fecto Color_7	
ÓGANO				60	Continuous	---	Por...fecto Color_60	

Figura 3.5.- Pantalla de capas de AutoCAD.

Con los croquis acotados de los 7 módulos en nuestro cuaderno y el listado de materiales por capas creado en el archivo de *CAD*, podemos empezar a dibujar.

El primer paso es generar un bloque o “molde” en 3D, que será el de la semi-nave central o mayor, en el que dejaremos definida la referencia de los pilares,

para ir pegando el resto de módulos en los que hemos dividido el modelo y que hemos ejecutado por separado.

En la figura 3.6, tenemos un ejemplo simplificado de cómo se han realizado los primeros pasos del proceso de modelización arquitectónica, de una parte del “molde” de un modulo de las naves laterales y de la bóveda de crucería del mismo.

En este ejemplo partimos de una “polilínea 3D”, que extrusionamos con la altura de la nave lateral (47 pies), hasta el arranque de la bóveda, teniendo la opción de dibujarlo también con la orden de sólidos “prisma”. A la hora de dibujar el sólido de la bóveda partimos de un cilindro que tallamos con la opción “cortar” puesto que no podemos trabajar con superficies curvas, como ya hemos comentado, debemos de convertir el semi-cilindro en un poliedro regular, de cuatro u ocho caras, cortando el sólido del semicilindro.

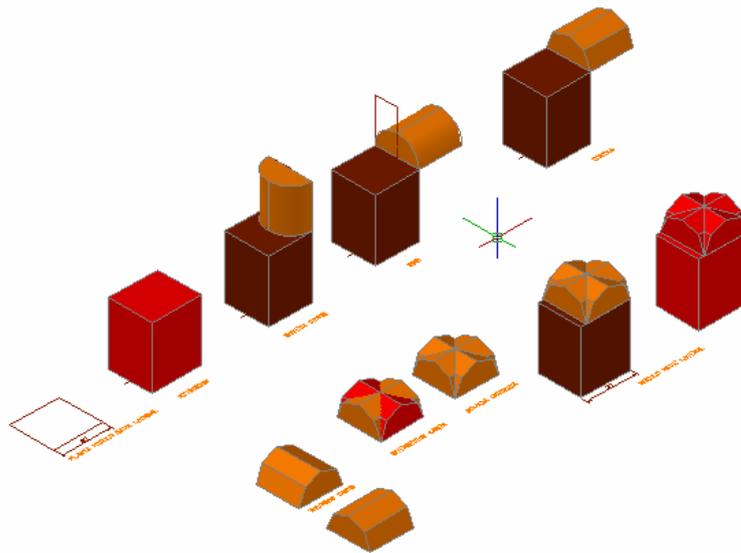


Figura. 3.6.- 1^{er}. Paso en CAD, dibujamos el “molde” con polilíneas y sólidos.

Para ejecutar la bóveda de crucería, al semicilindro tallado, hacemos una copia, la giramos 90º y los sumamos, (opción de la que no disponemos cuando trabajamos con la orden “caras 3D”), para que nos sirva de referencia o “molde” a la hora de dibujar las “caras 3D”, que posteriormente transformaremos en archivo de texto.

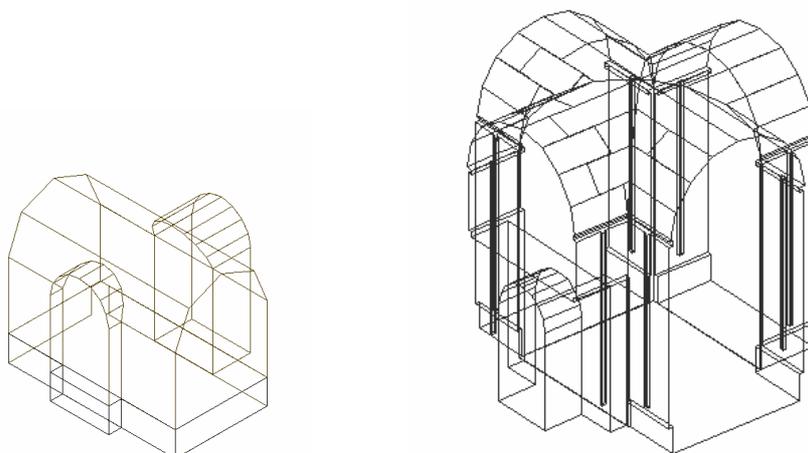


Figura 3.7.- 1^{er}. Módulos de capilla y nave lateral o menor en CAD.

Como podemos comprobar este proceso no es complicado, probablemente exista otra forma de realizar un modelo en “3D caras” más sencillo, pero se necesitan programas específicos de dibujo en 3 dimensiones, sus licencias, etc, de los que no disponemos. La dificultad más grande que encontramos, es la cantidad de elementos que tenemos que dibujar, a pesar de las simplificaciones realizadas. Tenemos que recordar que en esta ocasión se trata de una catedral inconclusa que, de haberse terminado, sería el segundo templo más grande del orbe, después de San Pedro en Roma.

Este proceso lo repetimos con todos los 7 módulos comentados, obteniendo el primer modelo o “molde” de la figura 3.8, compuesto por un total de 54 elementos, 15 líneas (auxiliares para referencia) y 39 sólidos 3D, (después de realizadas las sumas de los elementos más básicos) con lo que entendemos representamos el volumen interior de la mitad de la catedral.

Este modelo se puede transformar en regiones automáticamente con la orden “Descomponer” pero no en “caras 3D”. La ventaja de trabajar con “sólidos 3D”, es que el programa de dibujo (CAD) te permite ejecutar muchas más operaciones que con “3D caras”, básicamente la suma de sólidos. De esta forma podemos generar el espacio interior del recinto, que es lo que nos interesa, sin destacar los elementos constructivos del templo.

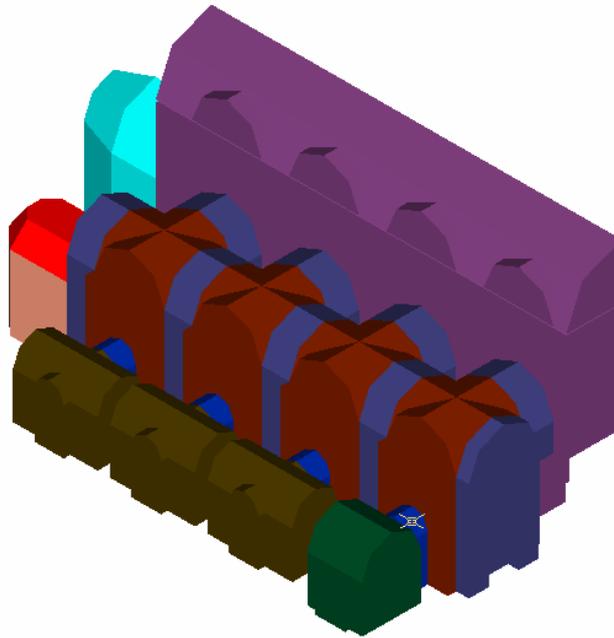


Figura. 3.8.-Proceso intermedio de dibujo, “molde” con sólidos 3D.

Entendemos que este método es suficientemente fiable y que cuanto más se domine el dibujo en tres dimensiones más se podrá optimizar el modelo. Lógicamente el tiempo de ejecución, depende del recinto a modelizar y de la definición que necesitemos en nuestro trabajo. Una vez que disponemos de un “molde” del modelo, pasamos a trabajar con la orden que nos va a proporcionar la posibilidad de transformar el dibujo en texto, archivo que en *CATT* llamaremos *MASTER.GEO*. Objetivo de esta modelización, como hemos comentado.

El proceso que hemos seguido para conseguirlo, es utilizar el sólido de base o referencia para ubicar los vértices de las superficies o planos ejecutados con la orden “caras 3D”, puesto que estos se pueden superponer, para posteriormente borrar el sólido. Esta operación de borrado la realizamos apagando la capa de las “caras 3D”. Una vez que tenemos todos los módulos transformados en “caras 3D”, los hemos pegado para la obtención del volumen a transformar o exportar con la herramienta de *CAD* “*autolisp*”. Este primer modelo del estado actual ya escalado (en el que todos sus planos son “caras 3D” sin terminar de simplificar nos da 2.457 planos, al que hemos denominado modelo arquitectónico, obtenido después del proceso comentado, es el de la figura 3.9), no nos sirve para la simulación.

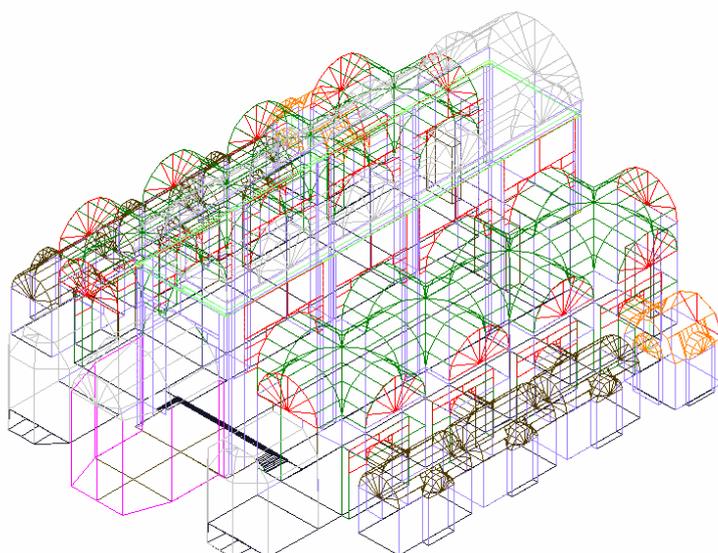


Figura 3.9.- Modelo arquitectónico, en AutoCAD 3D (2.457 Uds. Caras 3D)

La geometría obtenida presenta demasiados errores, muchos encuentros de planos, principalmente en los encuentros de las bóvedas, que generan fugas de rayos, que no podemos corregir en *CAD*, por mucho que ajustemos los vértices de los planos, lo que la hace inviable para modelo acústico, pero siendo un paso intermedio necesario para la obtención de este.

En consecuencia, optamos por simplificar el modelo arquitectónico, teniendo como objetivo la reducción del el mayor número de vértices (*córnices*) y planos posibles, sin que se alteren las características acústicas del recinto. Con esta segunda simplificación, obtendremos el modelo que llamaremos acústico¹¹. Una vez que transformamos el dibujo en texto, trabajamos con los archivos de *CATT*, olvidándonos temporalmente del dibujo en *CAD*, ajustando y corrigiendo en la geometría, los errores generados por los algoritmos de transformación, para evitar la fuga de rayos en *CATT*.

La primera medida de esta simplificación es optimizar la propiedad de la orden de *CAD* “caras 3D” que la localizamos de la siguiente manera “Dibujo/superficie/cara 3D”, que permite un máximo de cuatro vértices, sustituyendo el mayor número de superficies triangulares posible por superficies cuadrangulares. (Figura 3.10)

¹¹.- Modelo acústico, porque son las características acústicas las que prevalecen en la simplificación y es la geometría básica que va a generar los datos que vamos a estudiar en esta memoria acústica.

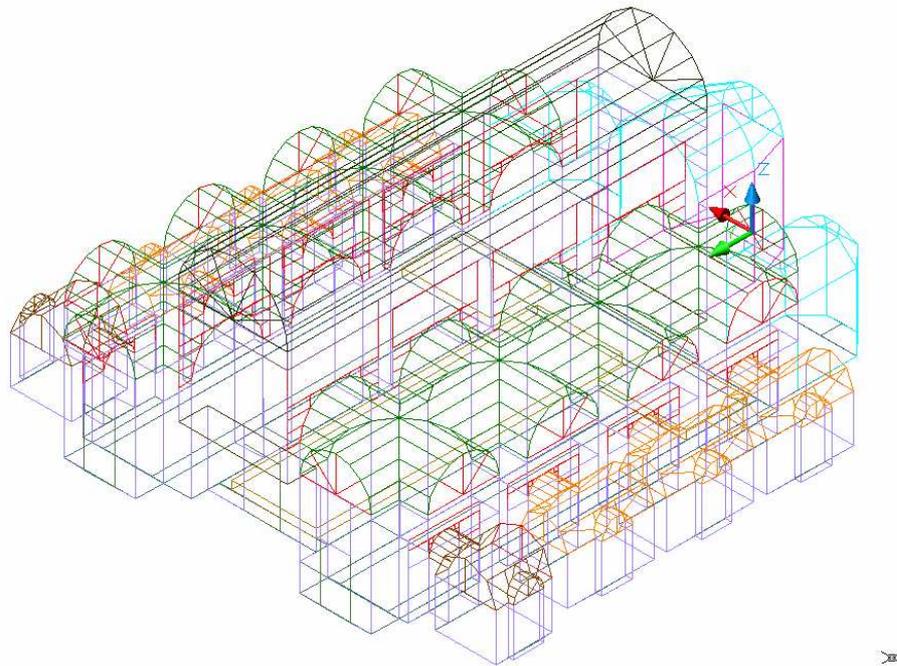


Figura. 3.10.- Modelo acústico, en AutoCAD 3D. (1.161 Uds. Caras 3D)

También eliminaremos algunos de los elementos arquitectónicos considerados inicialmente como la cornisa de la nave mayor, los lunetos de la bóveda de cañón y el peldañado del presbiterio, entre otros. De esta segunda simplificación obtenemos el modelo acústico del estado actual de la catedral. Este modelo lo componen 1.161 planos o “caras 3D”, 1.296 menos que el anterior. Como ya lo tenemos escalado únicamente, fijamos el vértice de coordenadas, en el fondo del presbiterio desplazando el dibujo y a continuación lo transformamos en archivo de texto. Tanto la fuente como los receptores los incluiremos una vez tengamos el modelo en *CATT*.

La transformación del dibujo en *CAD* en archivo de texto, la realizamos siguiendo las instrucciones de los apuntes de practica de la asignatura, Acústica de Salas. A la hora de transformar el dibujo en texto, es aconsejable tener activadas únicamente las capas con los materiales que tengan el mismo coeficiente de absorción, (mismo color) en cada “*put*”¹² o selección. Este proceso es muy rápido, puesto que los planos de cada material están ordenados en capas desde un principio. Los pasos posteriores, correcciones en *CATT*, son otra historia que comentaremos más adelante.

¹².- Orden de AutoCAD del procedimiento de AUTOLIPS que permite seleccionar caras 3D para transformar en texto.

El modelo en formato de texto, que ya puede leer el programa de simulación lo podemos ver en la figura 3.11, como archivo de dibujo “*Plot-file viewer. View4.PLT*”

```
Plane 662 -o : PUERTASMADERA, S= 35,54m²
PUER_MADERA <18 26 24 10 10 10 : 10 10>
```

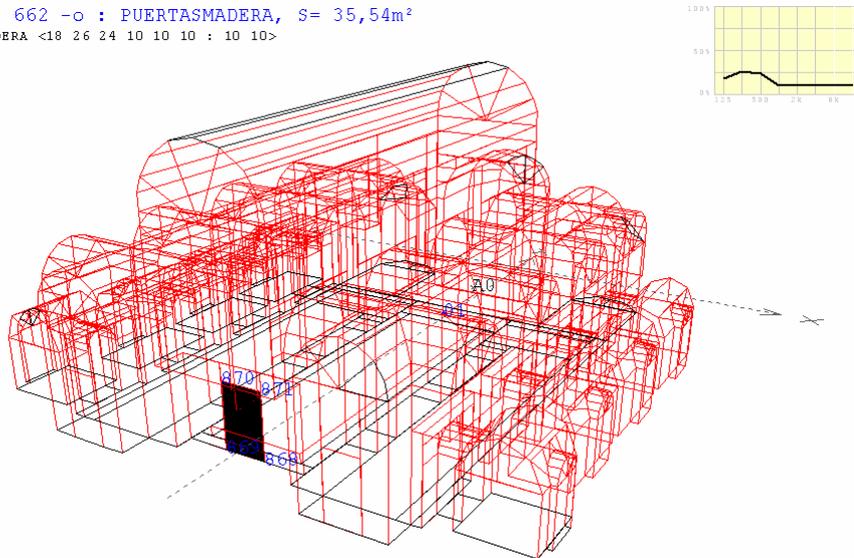


Figura. 3.11.- 1^{er} Modelo acústico en CATT (1.161 planos)

Esta geometría también nos da muchos errores (más de 1800) con unas fugas que empiezan con el 75% y en los primeros ms superan el 100% de pérdidas de rayos, incluso sobrepasando este porcentaje, como podemos comprobar en la grafica de la figura 3.12, geometría que tenemos que corregir para evitar fugas, ya que cualquier error en la misma puede afectar al cálculo de la simulación, distorsionando los resultados.

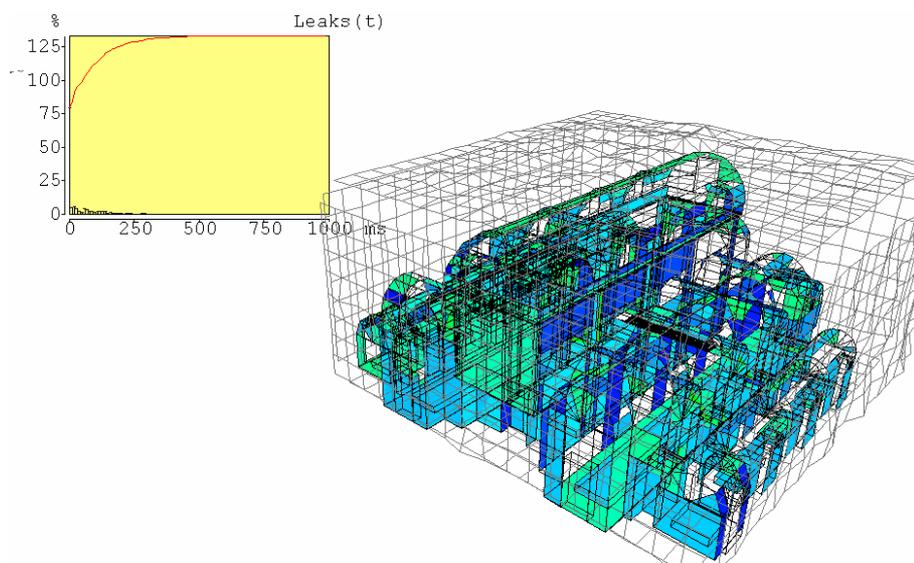


Figura. 3.12.- % de fugas con la 1^a geometría sin corregir.

Afortunadamente el programa nos facilita una lista completa de las correcciones a realizar para cerrar el modelo (Figura. 3.16). Listado que se presenta de la siguiente forma:

```

.- SINGLE-CONNECTED CORNERS :
  Corner 17 (only used in plane 6)
  Corner 744 (only used in plane 594)
  Corner 1032 (only used in plane 739)
  Corner 1285 (only used in plane 983)

.- INACCURATE PLANE CORNERS :
  Corner 799 is OUT by 0,0002 in plane 919 : BOVEDASYESO
  Corner 15 is OUT by 0,0059 in plane 1088 : CORTINASTERCIOPELO
  Corner 891 is OUT by 0,0059 in plane 844 : CORTINASTERCIOPELO
  Corner 816 is OUT by 0,0001 in plane 627 : BOVEDASYESO...
    
```

Más otros 556 mensajes similares en este apartado.

```

.- EDGES CUTTING/TOUCHING :
  Edge from corners 22 to 1102 in plane 844 touches plane 6
  Edge from corners 1119 to 1118 in plane 857 cuts plane 909
  Edge from corners 575 to 581 in plane 488 touches plane 478
  Edge from corners 575 to 581 in plane 488 touches plane 478
  Edge from corners 575 to 581 in plane 488 touches plane 475
  Edge from corners 575 to 581 in plane 488 touches plane 475
  Edge from corners 575 to 581 in plane 488 touches plane 445
  Edge from corners 562 to 568 in plane 487 touches plane 476
  Edge from corners 562 to 568 in plane 487 touches plane 476...
    
```

Más otros 618 mensajes similares.

```

.- POSSIBLY REVERSED PLANES :
  ...39 41 43 111 113 115 183 185 187 238 256 284
  310 328 356 382 400 428 476 477 547 1116 1122 1127
  1132 1149
    
```

Más otros 652 planos mal orientados.

En total unos 1870 errores, que en primer lugar hay que localizar en la geometría de la nube de vértices (figura 3.13) y en el resto de archivos, para poder corregirlos individualmente. Cada apartado tiene su proceso específico y estos los podemos resumir en los siguientes puntos:

1. Duplicidad de planos.
2. Duplicidad de vértices.
3. Vértices únicos.
4. Planos con vértices inadecuados.
5. Planos en los que no se han incluido todos los vértices de su perímetro.
6. Posibles planos mal orientados.

Como podíamos suponer este problema ya se ha intentado resolver por otros equipos. Radha Empar Montell Serrano, hace una “propuesta de herramienta para corrección geométrica” en su Tesina de máster¹³, comentando en las conclusiones del capítulo 4: “Esta herramienta forma parte de un trabajo en proceso por lo que se ha presentado un estudio parcial. En éste se ha podido comprobar que los diferentes tipos de errores están relacionados, y que la resolución de uno de ellos puede conllevar a la reducción de otros errores”.

Trabajo que se enmarca dentro del proyecto de investigación “*Estudio de parámetros objetivos y subjetivos evaluadores de la calidad acústica percibida en salas, auditorios y edificios del patrimonio histórico –artístico. Validación de un protocolo de calidad acústica, mediante entornos virtuales para su aplicación en proyectos de nueva planta y/o rehabilitación*” (BIA2008-05485)

Del que desconocemos los resultados.

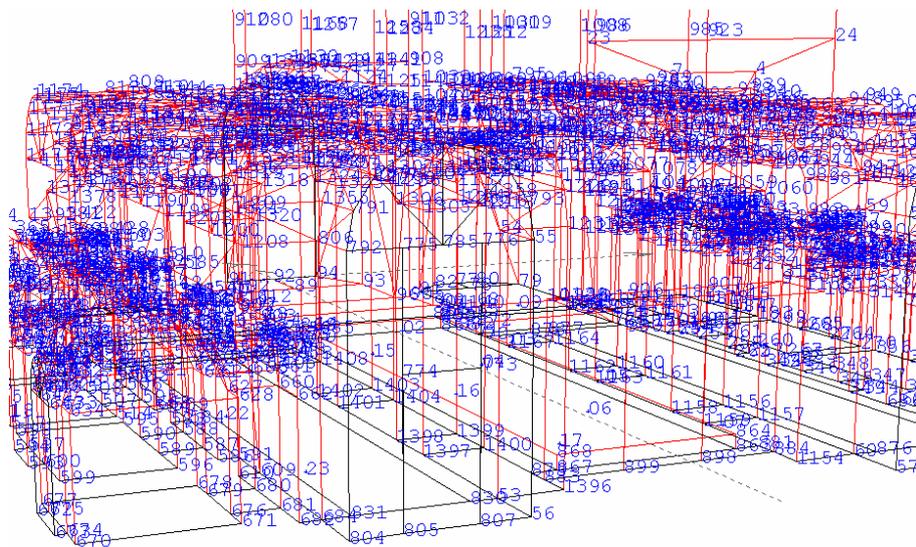


Figura. 3.13.- Vista de la nube de vértices del modelo.

Estos errores a subsanar tienen distinto origen, algunos los hemos cometido en el dibujo, básicamente en el encuentro de los planos de los módulos de las bóvedas, pero en su mayoría son creados por los conversores de CAD, que usan algoritmos de mallado no uniforme (Giménez, A. et al. 2011) o condiciones que no se han contemplado hasta ahora. Los tres primeros puntos son fáciles de corregir y no tienen demasiadas dificultades añadidas, el problema importante son los apartados 4, 5 y 6, debido a la cantidad y forma de los planos empleados en el modelo.

¹³ .- “Sistemas de realidad virtual para el estudio del campo acústico de edificios del patrimonio artístico-cultural” U. P. Valencia.

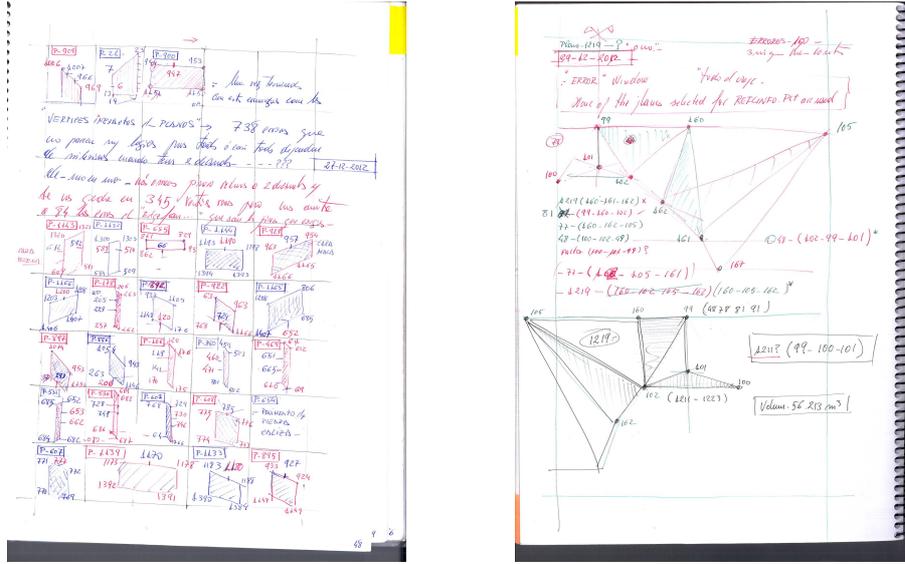


Figura. 3.14.- Proceso de corrección de errores

El número 4, planos con vértices inadecuados (*Inaccurate plane corners*) entendemos que es debido a la precisión de CATT, puesto que no admite superficies alabeadas, generadas en los planos definidos por cuatro vértices, y en la mayoría de los casos por diferencias en las milésimas y diezmilésimas, cuando tenemos las coordenadas de los vértices ajustadas en centésimas. La solución por la que hemos optado es triangular las superficies¹⁴, puesto que no sabemos limitar los decimales de los resultados de la geometría de CATT, aumentando considerablemente el número de planos.

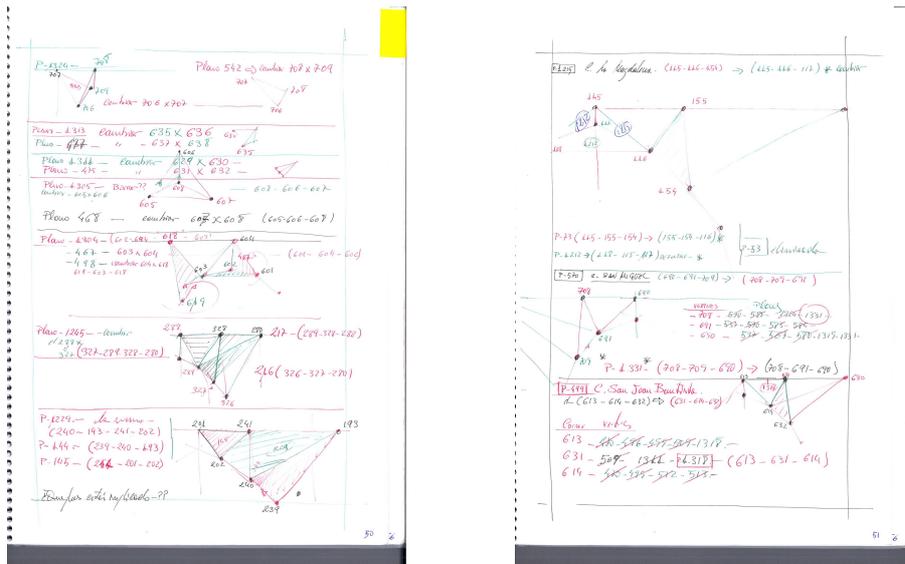


Figura. 3.15.- Proceso de corrección de errores

¹⁴.- El número mínimo de vértices de un plano son tres, es por lo que eliminamos la opción de inadecuado.

El punto 5, planos en los que no se han incluido todos los vértices de su perímetro (*Edges cutting/touching*), debería de ejecutarlo automáticamente el programa.

El punto 6º, se explica por qué a la hora de dibujar las caras en 3 dimensiones, no se ha tenido en cuenta el sentido de seleccionar los vértices y desconocemos el criterio que utiliza el programa para numerar los mismos. Es por lo que nos encontramos con más del 60% de estos mal orientados, debiendo comprobar uno a uno todos los planos del modelo, en el archivo "*plot-file viewer-PLINFO.PLT*" (Figura. 3.11), e ir subsanando la orientación de estos.

Para realizar estas modificaciones así como subsanar todos los mensajes de error que nos comunica el programa de simulación *CATT*, hemos pasado la "GEOMETRIA" (con un, copia y pega) a una hoja "Excel" puesto que entendemos que se agiliza las modificaciones y estas correcciones son muchas y muy repetitivas. También pueden realizarse directamente en *CATT*, pero tenemos más práctica en "Excel". De la selección de los vértices o córneres en exclusiva, (sin incluir a los planos) los separamos en columnas (Datos → texto en columnas) después reducimos los decimales de 4 a 2, previo a regularizar en cada coordenada el elemento separador de decimales, con la orden "EDICIÓN-----→REEMPLAZAR", así como el resto de deficiencias que se detecten.

El tercer paso, que tenemos que ejecutar, es pasar todos los datos corregidos a archivo de texto, eliminando las tablas generadas en "Excel", para poder procesar los mismos. Tenemos que tener claro que este proceso de ajuste de planos y corrección de errores es iterativo, puesto que a la primera vuelta no hemos conseguido eliminar todas las deficiencias del archivo de vértices y el programa sigue dando errores.

Después de corregir todos los apartados, *CATT* nos facilita el siguiente fichero de depuración o mensaje con los errores pendientes de la figura 3.16:

```

File Edit Search Character Template Help
CATT-Acoustic v8.0b debug : 1_MODELO CATEDRAL_7
-----
DUPLICATE PLANE ID's      : no !
PLANES MODELLED TWICE     : no !
DUPLICATE CORNER ID's    : no !
DUPLICATE CORNERS        : no !
SINGLE-CONNECTED CORNERS  : no !
INACCURATE PLANE CORNERS : no !
EDGES CUTTING/TOUCHING    : no !
POSSIBLY REVERSED PLANES : no !
-----
    
```

Figura. 3.16.- Mensaje de modelo correcto CATT

Esta pantalla, en la que el programa de simulación nos dice que no se ha detectado ningún error en la geometría del modelo virtual (todavía tiene alguna fuga de rayos), ya puede considerarse un modelo fiable y los datos generados por este modelo virtual nos indican la calidad acústica del recinto, con las reservas comentadas, debidas principalmente a la simplificación de la geometría de la sala.

Los planos de planta, alzados y perspectiva así como la ubicación de los receptores, el centro de coordenadas establecido, la ubicación de la fuente y la superficie de la audiencia (en gris), el volumen total aproximado y una escala grafica, los podemos ver en la figura 3.17, que es la transformación a CATT del modelo generado en CAD, y que genera el programa de simulación con el nombre de "Plot-file viewer-PLINFO.PLT".

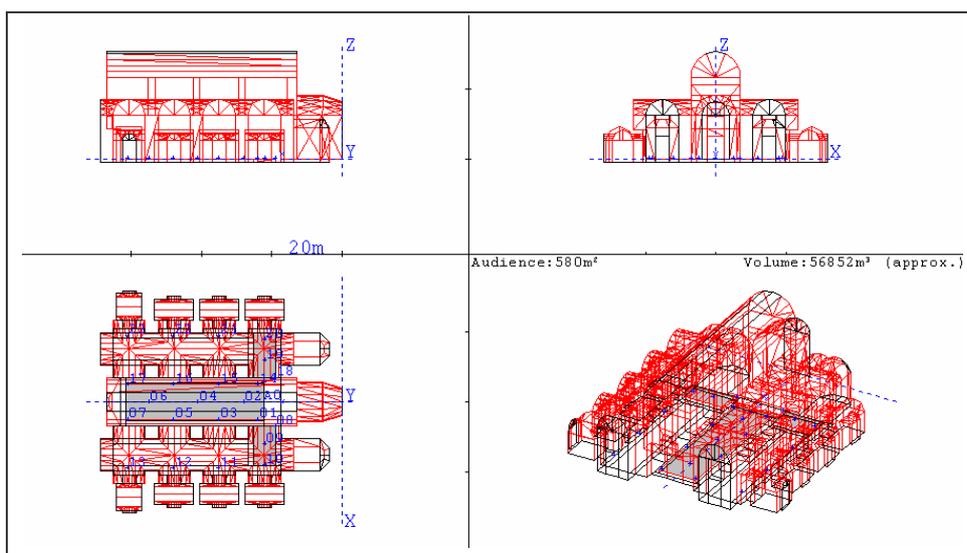


Figura. 3.17 Planta, alzados y perspectiva del modelo cerrado.

Con este modelo cerrado, figura 3.18, cumplimos con el primer objetivo de este apartado y podemos empezar a configurar el programa de simulación e introducir en *CATT* los datos de partida básicos, (fuente, receptores, ruido de fondo, temperatura, etc) para que el programa nos facilite los parámetros acústicos que caracterizan la sala.

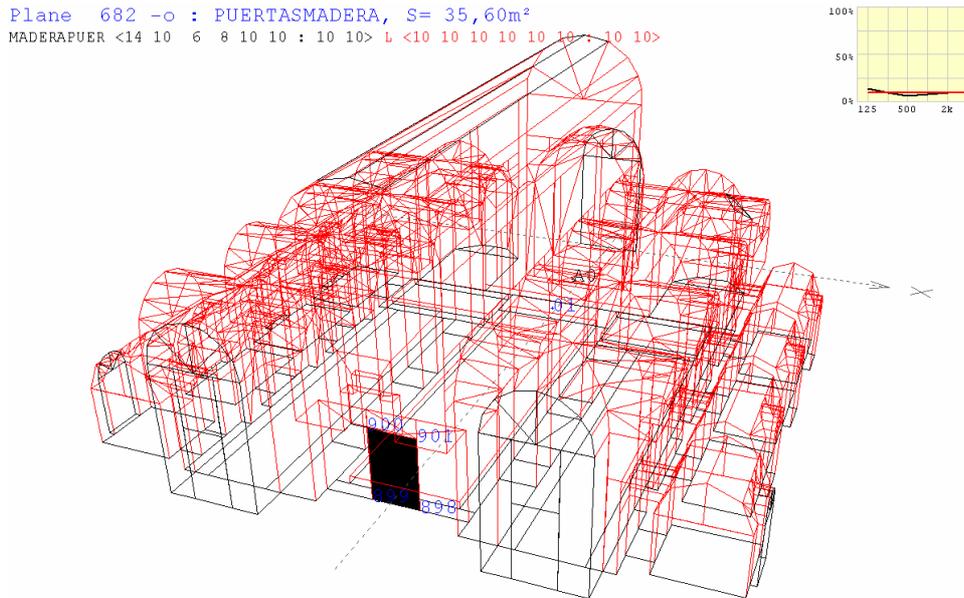


Figura. 3.18.- 2º Modelo acústico, con geometría corregida en *CATT* (1.474 planos)

Como se puede comprobar en la grafica de la figura 3.19, (% de fugas / tiempo de truncamiento, en milisegundos) de este primer modelo virtual del estado actual de la catedral, las fugas de rayos son inferiores al 0,200 % exactamente 0,1388 %, o lo que es lo mismo, 21 de 15.130 rayos empleados en este ejemplo y con un tiempo de truncado, elegido por el programa, de 2.375,7 milisegundos, con lo que entendemos, que los resultados de la simulación pueden considerarse fiables, para la geometría de este modelo.

En el los supuestos que utilizamos para obtener los datos de los parámetros acústicos a estudiar y que entendemos caracterizan acústicamente la catedral, aumentaremos el número de rayos por banda de octava a 200.000, puesto que el programa propone, si lo dejamos a su elección 142.044, siendo conscientes de que el tiempo de procesado del algoritmo "*Full detailed calculation*" se incrementa sustancialmente.

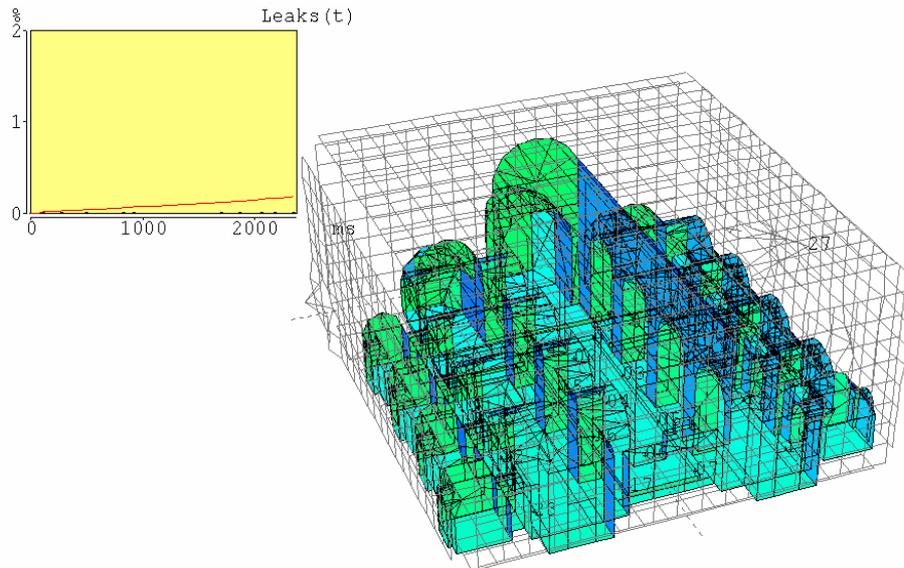


Figura. 3.19.- 1^{er}. Modelo con geometría corregida en CATT.

Cerrado el primer modelo del estado actual (1.474 planos), nos empezamos a plantear la obtención del segundo modelo virtual, con una geometría ya desaparecida, lo que algunos autores llaman “acústica arqueológica” (Álvarez, L. et al, 2011, p.p. 107), aprovechando la experiencia obtenida a la hora de la elaboración del 1^{er} modelo y de la cantidad de errores generados por los conversores en esta primera modelización, evitamos este paso.

En esta memoria entendemos por acústica arqueológica; la técnica acústica que se ocupa de recrear entornos arquitectónicos desaparecidos, para realizar el estudio y la valoración de las condiciones sonoras y visuales de estos. Evidentemente el éxito radica en aunar con rigor disciplinas humanísticas y tecnológicas, a priori muy distantes entre sí como son los estudios históricos del inmueble, de física aplicada y estadística, así como el manejo de *softwares* de modelado tridimensional y técnicas de procesado de señal, para la simulación acústica y la auralización.

En el caso particular de su aplicación al patrimonio arquitectónico, las técnicas inmersivas¹⁵ de realidad virtual se pueden integrar en la acústica arqueológica. Esta nos puede permitir escuchar interpretaciones en espacios virtuales, así

¹⁵.- La realidad virtual puede ser de dos tipos: *immersiva* y *no immersiva*. Los métodos inmersivos de realidad virtual con frecuencia se ligan a un ambiente tridimensional creado por un ordenador, el cual se manipula a través de cascos, guantes u otros dispositivos que capturan la posición y rotación de diferentes partes del cuerpo. La realidad virtual no inmersiva también utiliza el ordenador y se vale de medios como el que actualmente nos ofrece Internet, en el cual podemos interactuar en tiempo real con diferentes personas en espacios y ambientes que en realidad no existen sin la necesidad de dispositivos adicionales al ordenador. Nos acercamos en este caso a la navegación, a través de la cual ofrecemos al sujeto la posibilidad de experimentar (moverse, desplazarse, sentir) determinados espacios, mundos, lugares, como si se encontrase en ellos.

como sentimos envueltos por las condiciones acústicas y visuales de estos recintos.

En las figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23, presentamos unas vistas virtuales del interior de la catedral del 1^{er} modelo, generado por la geometría del estado actual, en las que se han incluido los receptores con su número y orientación.

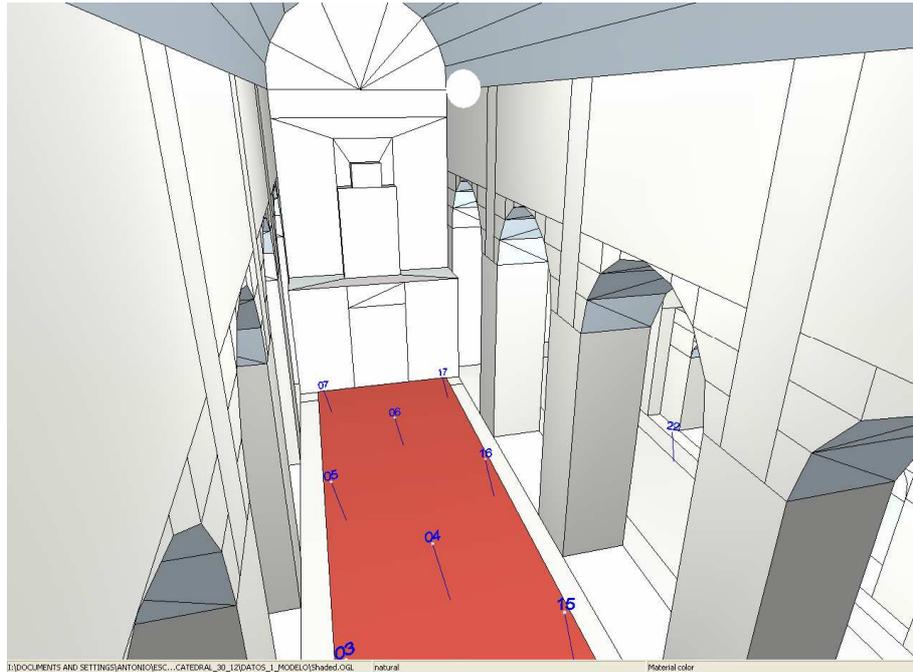


Figura. 3.20.- Vista virtual, interior del 1º modelo del "coro alto" generada por CATT

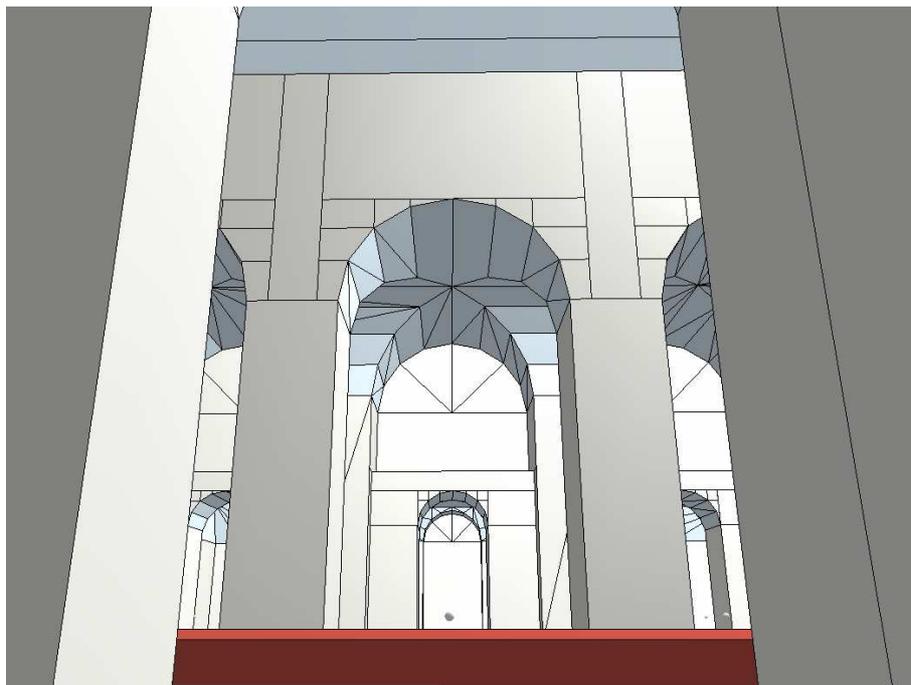


Figura. 3.21.- Vista virtual del interior desde el receptor número 12

En esta primera geometría del estado actual con el coro alto, donde se ubica el órgano romántico, se pueden apreciar las simplificaciones consideradas en el modelo, así como la simetría de la sala que nos permite reducir el estudio de los resultados obtenidos por la simulación a la mitad, puesto que las fuentes (A0 y A1) están ubicadas en el eje de simetría.

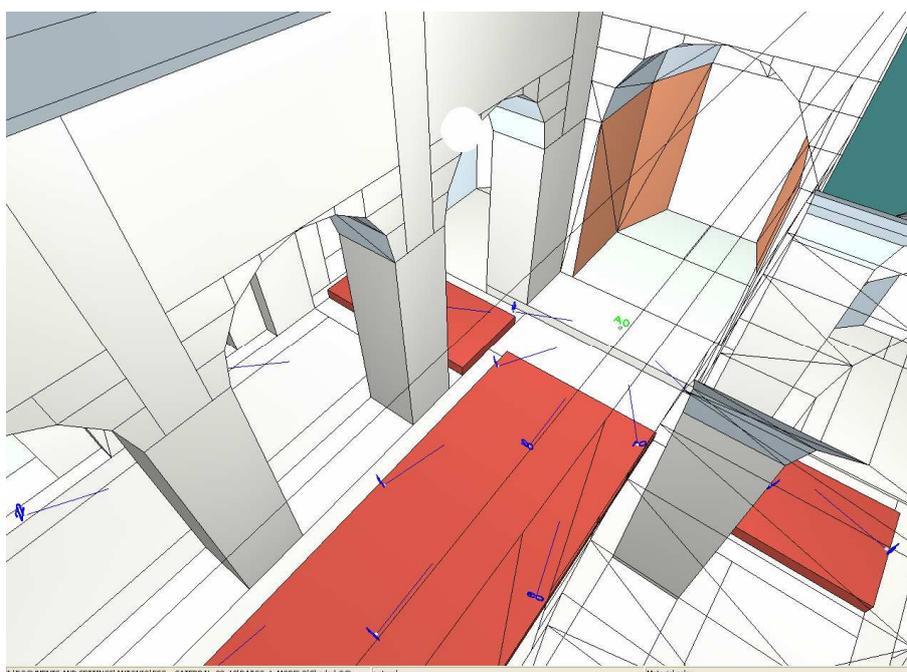


Figura. 3.22.- Vista virtual del interior al presbiterio con la fuente A0, del 1º modelo

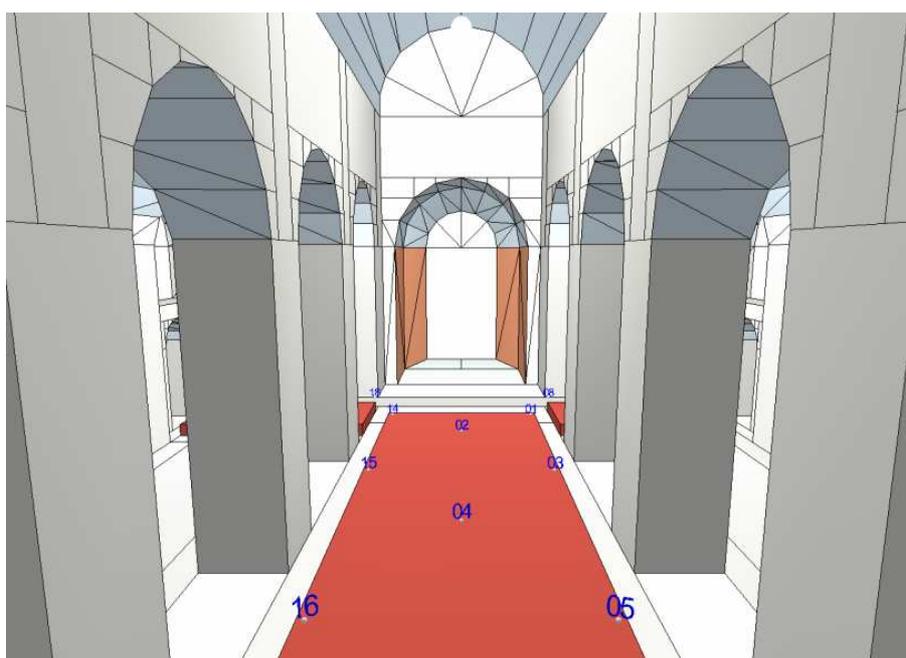


Figura. 3.23.- Vista virtual del interior, presbiterio desde el coro alto

3.3.2 PROCESO DE MODELIZACIÓN CON EL CORO BAJO

La eliminación del coro bajo, de su reja, el traslado de la sillería (parte de ella a la capilla mayor y el resto a la sala del cabildo, en edificio adjunto) y la aparición de los pulpitos, se realiza en la época del Obispo Remigio Gandasegui (1905-1937), nombrado Arzobispo de Valladolid en 1920, quien se adelantó a las modificaciones, de la Liturgia de la Misa, introducidas por el Concilio Vaticano II, en 1965. Modificaciones que el Obispo Salvatore J. Cordileone¹⁶ explica de la siguiente forma:

“En lo que concierne al desarrollo orgánico de la celebración de la misa, el Concilio ordenó una serie de cambios además de un mayor uso de las lenguas vernáculas, que asimismo tenían el propósito de enriquecer la liturgia de la Iglesia.

Entre ellos el más sobresaliente fue realzar el lugar que ocupa la Palabra de Dios en la liturgia. El nuevo Leccionario para la misa, con sus lecturas ampliadas, revivió el uso antiguo de incluir una lectura del Antiguo Testamento, además de la Epístola y el Evangelio (aunque en el tiempo de Pascua la primera lectura es tomada de los Hechos de los Apóstoles y la segunda del Libro de la Revelación).

Este nuevo énfasis se expresa también de otras formas, como convertir la homilía en parte integral de la liturgia, en lugar de un elemento extrínseco como introducido del exterior, y la restauración de la Oración de los Fieles para concluir la Liturgia de la Palabra.

El paradigma de continuidad, o desarrollo orgánico, se aplica igualmente a la música en la liturgia. Continuando en la dirección marcada por el Papa Pío X y seguida por sus sucesores, el concilio promovió el canto gregoriano de acuerdo a sus textos latinos, así como los textos vernáculos.

De hecho, planteó que al canto gregoriano se le diera el lugar primordial en el repertorio de la música litúrgica de la Iglesia (*principium loci*, comúnmente traducido como “lugar primordial”, que literalmente significa “el primer lugar”). Sin embargo, el concilio no destacó el uso de otras formas de música sagrada – mencionando específicamente la polifonía – así como el ulterior desarrollo de la música litúrgica. Pero tal evolución debía preservar el carácter de lo sagrado, en vez de contrastar con el, a tono con las tres características definitorias articuladas inicialmente por el Papa Pío X (sacralidad, belleza y universalidad)”.

¹⁶.- www.oakdiocese.org/offices/comunicacion/vaticano-ii

Para obtener la geometría del segundo modelo, que tenemos previsto estudiar con el coro antiguo, desaparecido por 1928, probamos con otra metodología totalmente distinta a la que hemos utilizado para generar el primer modelo acústico virtual.

El motivo de que en esta ocasión cambiemos el sistema, es el largísimo y tedioso proceso de corrección¹⁷ de la geometría generada por *CAD*. No obstante ejecutemos un croquis en este programa de dibujo, figura 3.24, para visualizar y referenciar el objetivo de este apartado. Si bien, en el modelo virtual simplificaremos el volumen de los órganos. Entendemos que es mucho más práctico partir de la geometría del estado actual, ya cerrada y dibujar los nuevos elementos con coordenadas¹⁸ (figura 3.25). Comentar que en la traza original de Juan de Herrera figuraba un coro bajo detrás del inacabado crucero.

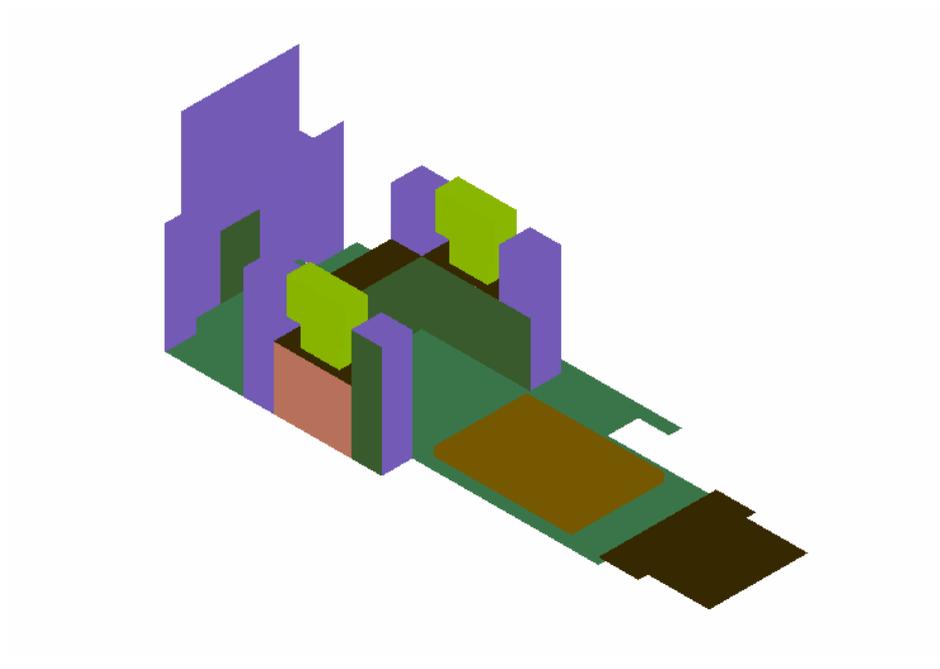


Figura. 3.24.- Simplificación de la nave mayor del modelo con coro bajo, en *CAD*

Para documentar esta geometría, de coro bajo, hemos estudiado algunas estructuras similares existentes en la provincia y de las que disponemos de

¹⁷.- Que como hemos visto, estos errores en las coordenadas de los vértices o corner de la geometría, se generan porque los programas conversores usan algoritmos de mallado no uniforme (Giménez, A. et al 2011), errores que lógicamente se multiplican con la geometrías complejas, como es el caso, a pesar de las simplificaciones realizadas.

¹⁸.- Dibujar con números, es generar vértices en el listado existente, que posteriormente formaran y definirán los planos del modelo virtual, teniendo en cuenta todas las prescripciones del programa.

documentación, como son la de la Colegiata de San Antolin¹⁹, en Medina del Campo y la de la Iglesia de los Santos Juanes²⁰, en Nava del Rey. También se ha consultado el trabajo de Juan Luis Sáiz Virumbrales, centrado en el Órgano romántico de Aquilino Amezua, en el que se plantea una hipótesis de su estructura. En la geometría de este segundo supuesto virtual hemos eliminado el actual coro, puesto que no existía, retranqueando los cortavientos de la puerta principal a una posición sensiblemente similar a la de las puertas laterales, al no tener noticias de que hayan sufrido grandes modificaciones, generando el volumen de las figuras 3.26 y 3.27.

Para modificar la geometría del estado actual e introducir el volumen del coro bajo y los volúmenes virtuales de los órganos, en la sala, hemos tenido que generar nuevos vértices, eliminar y crear planos, modificar planos existentes y por supuesto; corregir todos los errores²¹ detectados por el programa en el proceso. Esto es debido a que tenemos activada la pestaña “*Debug - immediate*” con todas las opciones posibles, así cada vez que hacemos una modificación realizamos un chequeo completo de toda la geometría (“Run”).

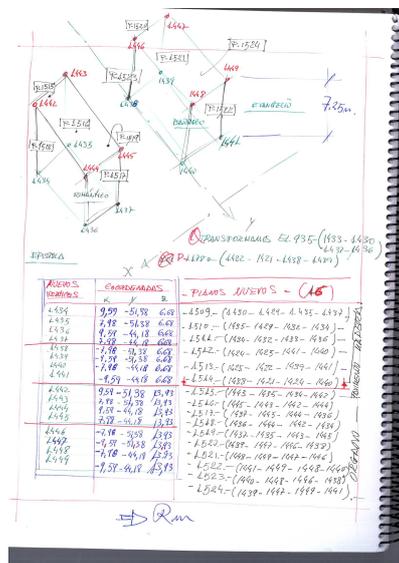


Figura. 3.25.- Datos del proceso de dibujo con números de los órganos y el coro bajo

¹⁹.- Colegiata de San Antolin, estilo gótico tardío, siglo XVI a XVIII. El coro se encuentra en la nave central, con sillería compuesta de 33 sitalia altos y 21 bajos cuyos relieves se disponen de forma alternativa sobre los sitalia altos.

²⁰.- Iglesia de los Santos Juanes en Nava del Rey, de estilo renacentista, de Rodrigo Gil de Hontañón, comenzándose las obras a mediados del siglo XVI. De planta de salón de tres naves, la central más ancha que las laterales, de igual altura, y divididas mediante gruesas columnas de estilo dórico.

²¹.- En número sustancialmente inferior al del modelo inicial.

En esta ocasión los errores detectados por el programa no son debidos al uso de algoritmos de mallado no uniforme, si bien el número de estos es mucho más reducido y no supone demasiado tiempo su subsanación, al contrario que en el primer modelo, en el que este apartado es el que más tiempo ocupa, con mucha diferencia, de todo el proceso.

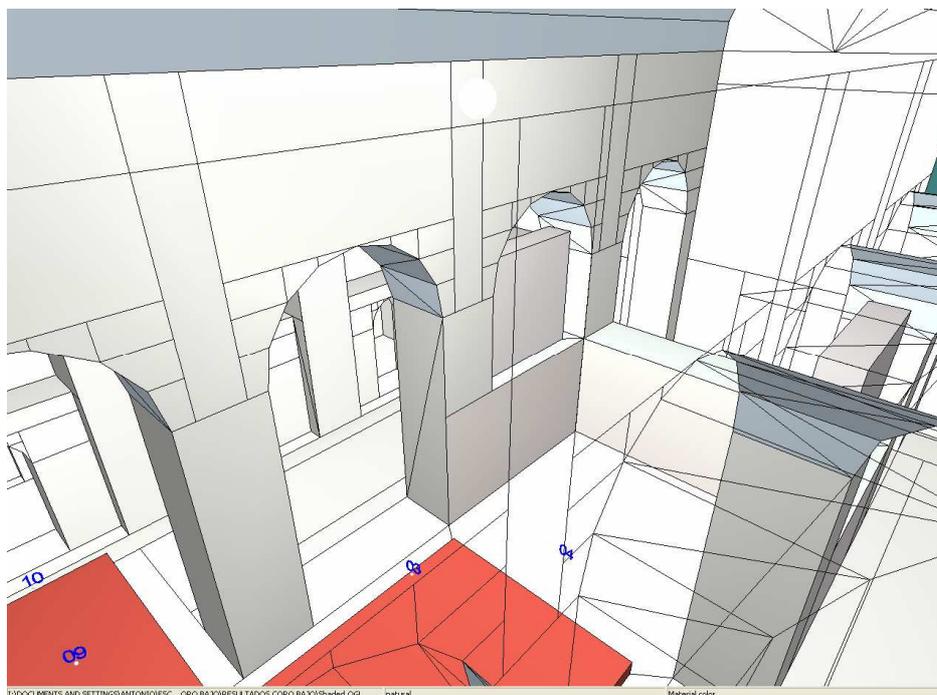


Figura. 3.26.- Vista virtual interior del 2º modelo, con el supuesto volumen del “coro bajo”



Figura. 3.27.- Vista virtual del interior desde el receptor N° 23

Una vez cerrado este segundo modelo, en la figura, 3.28, del archivo “*Plot-file viewer. View4.PLT*” generado por el programa, podemos ver la planta, alzados y perspectiva, muy similares a la del modelo del estado actual, exteriormente tienen la misma geometría, pero con varias diferencias importantes en el interior que afectan al volumen del recinto, reduciéndole unos 960 m³, quedando en aproximadamente 55.894 m³, así como la superficie de audiencia, de la nave mayor, que se reduce unos 250 m². En este 2º modelo tenemos un total de 1.438 vértices y 1.483 planos, solamente 9 planos más que en el 1º modelo.

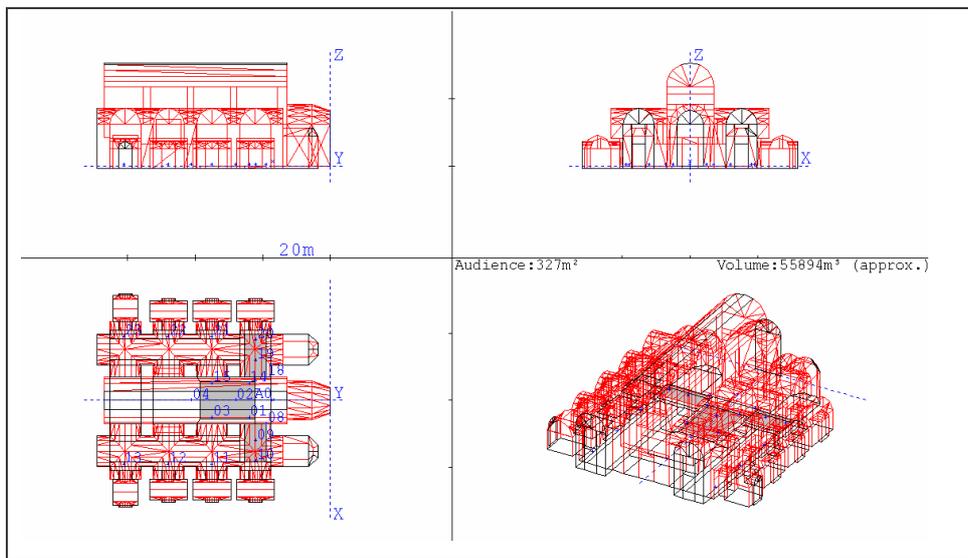


Figura. 3.28 Planta, alzados y perspectiva del 2º modelo virtual cerrado

4.- CÁLCULOS Y ANÁLISIS ACÚSTICOS

4.1.- CÁLCULOS

Antes de comenzar con el proceso de simulación para la obtención de los resultados acústicos, objeto de esta memoria, debemos de fijar y definir todas las preferencias del programa, así como los parámetros a estudiar más detalladamente. También debemos concretar las fuentes sus características y el número de los receptores, que definen los puntos en los que queremos conocer los parámetros del recinto, para lo cual hemos tomado como referencia la “UNE-EN-ISO 3382, Medición de parámetros acústicos en recintos”, sabiendo que el método de esta norma UNE, está desarrollado para la obtención *in situ* de los tiempos de reverberación y de otros parámetros acústicos en salas de espectáculos a partir de respuestas impulsivas y del ruido interrumpido, a pesar de que en esta ocasión no se van a realizar mediciones.

Las fuentes como recomienda la norma, están ubicadas donde se situarían las que entendemos naturales. En este trabajo vamos a considerar 3 posiciones diferentes, con dos geometrías distintas, lo que nos da un total de 4 supuestos. La primera geometría que estudiamos es la del estado actual, con la fuente en el presbiterio (“A0”), suponiendo una actuación musical para la audiencia de la primera geometría, expuesta en la figura 4.1. La segunda fuente en el supuesto del estado actual, la situamos en el coro alto (“A1”), ubicación actual del órgano romántico de A. Amezua y C^{IA}, encima de la puerta principal a unos 12,00 m. del suelo del presbiterio.

La tercera situación a estudiar es con la geometría del coro bajo desaparecido en 1928¹, en este caso mantenemos la primera fuente considerada (“A0”), como en la primera geometría. En el cuarto supuesto introducimos una nueva posición de la fuente encima del coro bajo (“A2”), anterior ubicación del órgano romántico, a unos 8,20 m. del suelo del presbiterio. Como se ha comentado, nos centramos en los parámetros que definen la acústica musical, puesto que dadas las características físicas del recinto, para que la palabra (que sigue teniendo mucha importancia en la liturgia de la misa), tenga unos niveles

¹.- Junto con su verja, que después de pasar por una chatarrería Vallisoletana, ha terminado en el Museo Metropolitano de Nueva York.

mínimos en toda la audiencia considerada (60,0 dB), se requiere de la electroacústica o de soluciones específicas como los desaparecidos pulpitos².

En los cuatro supuestos a analizar mantendremos el resto de preferencias genéricas del programa, como el ruido de fondo, condiciones físicas del aire o parámetros de propagación del sonido, etc, para poder comparar los resultados de las dos geometrías comentadas.

Otra recomendación de la norma es, situar a las fuentes a 1,50 m por encima del suelo, “para evitar una modificación de baja frecuencia de la potencia de salida de la fuente en el rango de frecuencias de medición”. Las tres fuentes consideradas en los supuestos tienen las mismas características de emisión, modificando únicamente su ubicación. Los niveles de emisión por frecuencias, son los propuestos por el programa, en el ejemplo de su manual³, entendiéndose que se ajustan a la situación que queremos estudiar. El resto de parámetros necesarios para completar el proceso, que no hemos comentado en este trabajo, se ajustan a las condiciones predeterminadas por el programa.

Para los receptores la norma UNE-EN-ISO 3382, recomienda repartirlos de forma uniforme sobre la sala para que los resultados sean representativos del recinto, adjuntando una tabla de mínimos⁴, así como también aconseja separarlos un mínimo 1,00 m de la superficie reflectante más cercana y 1,20 m del suelo. En las figuras 4.1 y 4.2, podemos ver la ubicación de los mismos, repartidos simétricamente. El motivo por el que no se ha considerado la mitad de los mismos, aprovechando la simetría de la sala, es que una de las fuentes no está ubicada en el eje de simetría. El número de receptores que entendemos nos pueden caracterizar la sala son 23.

Las cotas de los receptores (*RECEIVERS*) considerados son:

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1.- 5.00 -24.00 0.37 | 2.- 0.00 -28.00 0.37 |
| 3.- 5.00 -35.00 0.37 | 4.- 0.00 -35.00 0.37 |
| 5.- 5.00 -48.00 0.37 | 6.- 0.00 -55.00 0.37 |

².- La Catedral de Valladolid ha dispuesto de dos pulpitos de madera, ya desaparecidos, laminas V y VII, Chueca, F. 1947.

³.- $L_{p1m_a} = \langle 70 \ 73 \ 76 \ 79 \ 82 \ 85 \rangle$, en dB.

⁴.- UNE-EN-ISO 3382. Número mínimo de posiciones del receptor en función del tamaño del auditorio:

Número de asientos	Número mínimo de posiciones de micrófono
500	6
1000	8
2000	10

7.- 5.00 -61.00 0.37	8.- 7.00 -19.00 0.37
9.- 12.00 -22.00 0.37	10.- 18.00 -22.00 0.37
11.-19.00 -35.00 0.37	12.- 19.00 -48.00 0.37
13.- 19.00 -61.00 0.37	14.- -5.00 -24.00 0.37
15.- -5.00 -35.00 0.37	16.- -5.00 -48.00 0.37
17.- -5.00 -61.00 0.37	18.- -7.00 -19.00 0.37
19.- -12.00 -22.00 0.37	20.- -18.00 -32.00 0.37
21.- -19.00 -35.00 0.37	22.- -19.00 -48.00 0.37
23.- -19.00 -61.00 0.37	

La dirección de los receptores considerada es hacia la fuente emisora (“*head direction*”) y estas omnidireccionales.

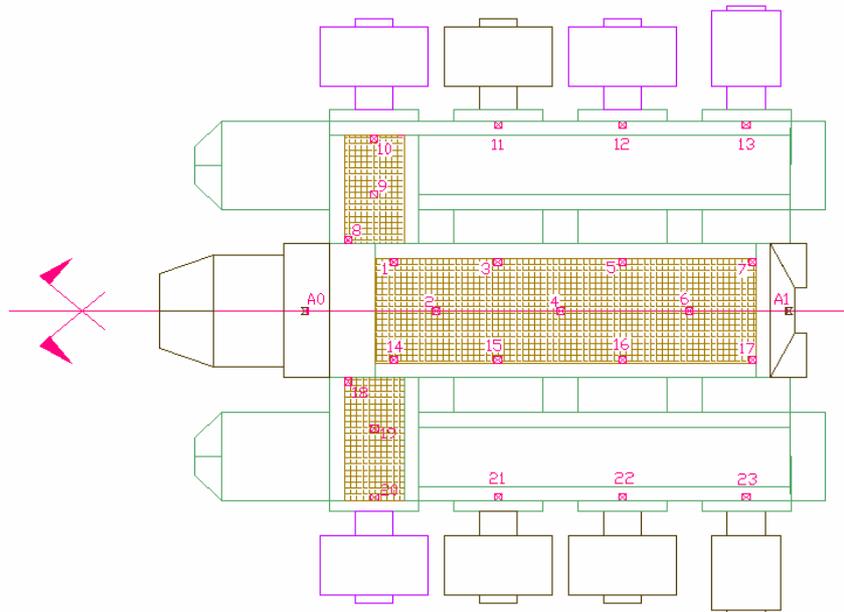


Figura 4.1.- Fuentes (“A0”-“A1”) y receptores (23) en planta, estado actual.

Una vez definidas las fuentes y los receptores continuamos fijando y confirmando el resto de datos que necesita el programa de simulación para poder comenzar con los cálculos⁵, entendiendo que estos deben mantener una coherencia en cada uno de los tres algoritmos que utilizaremos para cada supuesto a estudiar, estos algoritmos son: **Audience area mapping** (mapa de la zona de audiencia), **Early part detailed ISM** (modelo detallado de los parámetros de la fuente) y **Full detailed calculation** (cálculo detallado

⁵.- En el Anexo 2, hacemos un repaso a una sesión de CATT-Acoustic, donde comentamos todos los datos que necesitamos definir.

completo). Lo primero que fijamos es el número de rayos por banda de octava, para que el resultado de la simulación sea significativo (probamos con 50.000 y 75.000), en este caso fijamos 200.000 y un tiempo de truncado de 4.000 ms, aumentando significativamente el tiempo de procesado, puesto que si utilizamos la opción de “*auto number*” para el número de rayos y “*auto time*” para el tiempo de truncado, el programa propone 142.044 rayos/banda y 2.374,1 ms. También fijamos el número de reflexiones en cinco, teniendo activadas todas las frecuencias del rango (125 Hz a 4.000 Hz), en los cuatro supuestos que vamos a considerar en esta memoria.

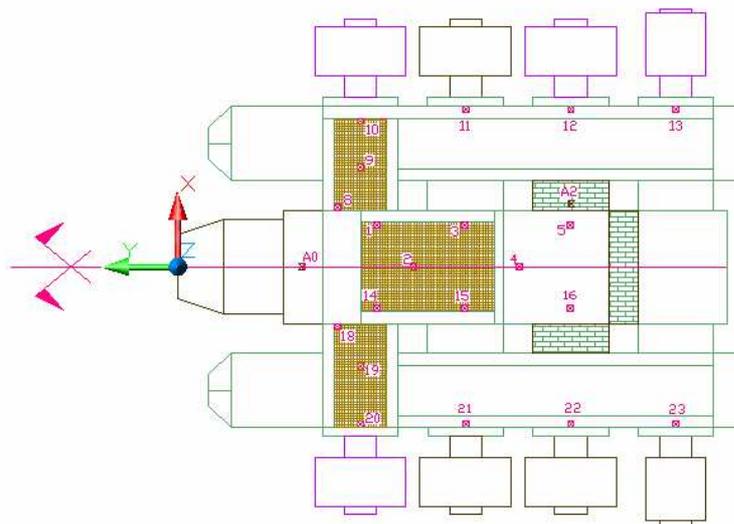


Figura 4.2.- Fuentes (“A0”-“A2”) y receptores (20) en planta con el coro bajo.

Los parámetros acústicos más importantes que caracterizan la sala son los que vamos a obtener de la simulación y son los que estudiaremos más detalladamente en cada caso, pudiendo dividirlos en los siguientes epígrafes: temporales, energéticos, espaciales y de inteligibilidad,

- el tiempo de reverberación (RT), parámetro que por si solo, caracteriza una sala. Calculado con la formula de Sabine, de C. F. Eyring, así como el T-15 y T-30,
- el nivel de presión sonora en cada receptor y en la zona de la audiencia (SLP), fuerza Acústica G (dB), claridad musical (C-80/dB), definición (C-50/dB),
- Eficiencia Lateral LF (%), relación entre la energía que llega lateralmente al receptor y el total, excluyendo el sonido directo.

- el RASTI/STI (%), es el parámetro que nos miden la inteligibilidad de la palabra.

El programa puede facilitar más parámetros como Decay (s), TI ((%), Ts (ms), EDT (s), con gráficos y geometrías en dos y tres dimensiones, con el único inconveniente del tiempo de procesado.

Una vez tenemos todos los datos cargados y hemos configurado el programa, procedemos al cálculo, teniendo cuidado de tener las carpetas de los resultados creadas. Este proceso no es nada rápido⁶ y generará muchos archivos⁷, solo con el primer modelo más de novecientos noventa y estos tienen que ordenarse correctamente. En esta memoria hemos creamos cuatro carpetas de resultados. Dos con la geometría del estado actual, una por cada posición de la fuente y otras dos con la geometría supuesta del coro bajo desaparecido, carpetas que con el resto de datos generados en este trabajo incluiremos en el CD, debido al tamaño de las mismas, escogiendo los más significativos para su análisis en esta memoria.

En todos los supuestos y debido al volumen del recinto a estudiar se ha considerado la absorción del aire, con las siguientes características que entendemos pueden ajustarse a las condiciones de la sala (predeterminadas por el programa excepto la temperatura):

Temperatura, 16 °C.

Humedad relativa, 50 %.

Densidad, 1,2 Kg. /m³.

Velocidad del sonido, 341 m/s

Impedancia, 409 Ns/m³

Coefficiente de difracción, 0,11 0,29 0,54 0,97 2,42 8,03 (0,001/m)

(CATT manual)

En el proceso de cálculo se ha tardado unas ocho horas por modelo, generando un total de 3.677 archivos de datos, diagramas y mapas, alguno de los cuales analizaremos y comentaremos en los siguientes apartados de este capítulo, comparando los datos de los cuatro supuestos.

⁶.- El tiempo de procesado depende del algoritmo, en nuestro caso, con las condiciones expuestas, el cálculo completo de un modelo tarda algo más de 8 horas.

⁷.- Para el primer modelo virtual, del estado actual de la inconclusa catedral, 996 archivos, de entre 1 KB y 399 KB.

El primer dato que nos facilita el programa en cada proceso es el de los receptores que no tienen visión directa de la fuente, en consecuencia, carecen de sonido directo, como hemos podido comprobar en los correspondientes ecogramas.

Para la fuente “A0” los receptores son: 11, 12, 13, 21, 22 y 23.

Para la fuente “A1”: 7, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 19, 20, 21, 22 y 23.

Para la fuente “A2”: 1, 3, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 22, y 23.

La distancia en metros de los receptores a la fuente es un dato que el programa no nos facilita directamente y tenemos que calcular a partir de las coordenadas de estos, en la tabla 4.1, adjuntamos un resumen de estas distancias, exclusivamente de los receptores que vamos a estudiar, puesto que nos ayuda a entender y explicar muchos resultados.

FUENTES	R ECEPTOR N°:					
	1	5	6	7	10	12
“A0”.	9,00	31,00	37,50	44,00	19,00	36,00
“A1”.	48,00	18,00	11,00	6,50	46,50	25,00
“A2”.	24,00	3,00	-----	13,00	27,50	12,00

Tabla 4.1.- Distancia en metros de fuentes a receptores seleccionados.

La distancia máxima recomendada tanto por motivos acústicos como visuales es de 30,00 m. (Carrión, A. 1998)

De todos los trabajos analizados no se ha encontrado ninguno con las características y estilo de la Catedral de Valladolid, adjuntando los valores promediados espacialmente y espectralmente de la Catedral de Sevilla, publicados en el trabajo; “*Initial Acoustic model to simulate the sound field of the Cathedral of Seville*” (Álvarez, L. et al. 2011).

- Volumen 216.192 m³

- N° de rayos por banda de octava, 300.000.

- Tiempo de truncado, 7 s.

	<u>Simulados</u>	<u>Medidos</u>		<u>Simulados</u>	<u>Medidos</u>
T ₃₀ (s).	4,73	4,86	EDT (s).	4,15	4,06.
Ts (ms).	227,89	272,86	D ₅₀ (%).	0,37	0,26.
C ₈₀ (dB).	-1,18	-3,63	J _{LF}	0,09	0,12.
G (dB).	0,30	1,23	STI.	0,52	0,48.

En el trabajo: “Revestimientos fijos y configurables en la acústica de las catedrales” de Rogelio Ruiz Martínez, et al, 2012 publica alguno de los parámetros acústicos de la catedral de Toledo, así como una tabla muy completa de coeficientes de absorción por frecuencias.

.- Volumen 120.000 m³

Frecuencias: 125 250 500 1000 2000 4000 Hz.

.- T-30 = 6,8 6,6 6,3 5,6 4,2 2,0 (s)

.- STI = 34 % Valor promedio, estado actual.

No obstante de la mayoría de los trabajos consultados no se ha podido hacer un resumen significativo de parámetros acústicos para compara con los obtenidos en este trabajo, debido principalmente a que no se ha considerado la absorción de la audiencia y que la presentación de los resultados de las simulaciones son graficas a unas escalas que no permiten medir con exactitud.

4.2.- ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DEL ESTADO ACTUAL

El análisis que vamos a comentar en este apartado, lógicamente, es el del modelo virtual de la catedral y este modelo está condicionado por las simplificaciones realizadas durante el proceso de modelado, ya comentadas, así como por el resto de parámetros que hemos tomado del programa. Recordando que estos modelos no están corregidos ni ajustados con mediciones *in situ*.

De los 23 receptores considerados en el cálculo global vamos a analizar los datos generados de los que entendemos más significativos de la sala, aprovechando su simetría, con el objeto de conocer el comportamiento acústico de la catedral. En los dos primeros supuestos, geometría del estado actual, analizaremos los datos de los receptores con los números; **01** (primeras filas de la audiencia de la nave mayor), **06** (final del centro de la audiencia de la nave mayor), **07** (esquina de las últimas filas de la audiencia de la nave principal), **10** (últimas filas de la audiencia de la nave del lado de la epístola) y **12** (entrada de la Capilla de San Pedro, en la nave menor del lado de la Epístola).

De todos los archivos generados, 996 corresponden al primer supuesto. Siendo este es el primer problema que nos encontramos a la hora de analizar los resultados del cálculo, la gran cantidad de gráficos, esquemas y listados. Después de un primer análisis detallado de estos archivos⁸, los hemos agrupado (sin ser exhaustivos) en 4 grandes grupos homogéneos que nos permitan localizar el archivo deseado dentro de su carpeta. Estos grupos son (sin contar con los post-procesados):

- .- Archivos con información geométrica del modelo a estudiar (COINFO.PLT, COLORED.PLT, WIEW4.PLT,...), con la extensión PLT.
- .- Archivos de texto con datos o listados de parámetros acústicos e información geométrica (DBBUG.TXT, E_A0_01.TXT, GEOPLT.TXT,...), con la extensión TXT.
- .- Archivo interactivo del modelo en 3D (SHADED.OLG), con la extensión OLG.
- .- Archivos con información acústica, específica de cada receptor por frecuencias (E_A0_01.PLT, H_A0_01.PLT, I_A0_01.PLT,...), con la extensión PLT.

⁸.- Un extracto de ellos es lo que se incluye en las figuras de esta memoria, adjuntando la totalidad en el CD.

Para el análisis acústico de los parámetros del monumento a caracterizar acústicamente, trabajaremos con dos grandes apartados, a) la acústica geométrica, en el que analizaremos los resultados de algunos receptores, ya definidos, estudiando sus ecogramas y b) la evaluación de los mapas de los parámetros acústicos de la zona de audiencia.

4.2.1 ACÚSTICA GEOMÉTRICA

El análisis de la acústica geométrica lo centramos en el estudio de los ecogramas o reflectogramas de cada receptor seleccionado, generados por el algoritmo “*Early part detailed ISM*” en la frecuencia central de 1000 Hz⁹, de los receptores mencionados en el apartado anterior. Estos gráficos nos informan del nivel de presión, en dB, del sonido directo y del tiempo de llegada de las primeras reflexiones¹⁰ o reflexiones especulares de 1º, 2º, 3º, 4º y 5º orden en ms. También podemos ver en la misma grafica la distribución y nivel de las reflexiones difusas, residuales o cola reverberante.

Los intervalos temporales considerados en este análisis, en general, no son los cuatro que predeterminamos en los mapas coloreados de los parámetros generados por “*Audience area mapping*”: de 0 a 20 ms, de 20 a 50 ms, de 50 a 80 ms, y de 80 a 150 ms, puesto que los algoritmos son distintos, no obstante estos intervalos se tienen como referencia, teniendo en cuenta que el objetivo principal de este análisis es detectar los posibles ecos y anomalías acústicas, en cada uno de los supuestos estudiados. Pudiendo estructurar este análisis en cuatro apartados siguientes:

- a) ubicación, visibilidad y distancia a la fuente,
- b) nivel de presión del sonido directo,
- c) distribución en el tiempo de las primeras reflexiones y reverberación,
- d) existencia de ecos.

- Receptor nº 01, situado a unos 9,00 m de la fuente “A0” y 48,00 m de la “A1” con visión y sonido directo de ambas. En el archivo interactivo “H_A0_01_1K”, de la figura 4.3, podemos ver el ecograma generado por la fuente “A0” para este receptor en la frecuencia de 1KHz. También podemos analizar la trayectoria de los rayos en tres dimensiones y ver los planos en que

⁹.- Todos los comentarios que realizamos en este capítulo están referidos a la frecuencia central de 1000 Hz.

¹⁰.- Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor (Carrión, A. 1998).

se refleja cada uno, así como los gráficos de directividad del receptor y la fuente.

En este ecograma interactivo comprobamos que en los primeros 20 ms, se produce la llegada del sonido directo con un nivel de unos 60,0 dB y las primeras reflexiones de los planos más cercanos (suelo y audiencia), existiendo un intervalo importante sin ninguna reflexión hasta la llegada del segundo grupo de primeras reflexiones de tercer, cuarto y quinto orden (que es el límite que hemos fijado, en azul), entre los 90 y 150 ms, todas con un nivel de presión inferior a los 45,0 dB. El nivel de presión total con la fuente "A0", para esta frecuencia, del receptor 01 es de 62,5 dB (dato que obtenemos del archivo de texto "E_A0_01.TXT").

También podemos comprobar que las reflexiones tardías de orden inferior (cola reverberante, en rojo) no superan los 40,0 dB. En un primer sector de 25 a 75 ms, descendiendo rápidamente el nivel a medida que nos acercamos a los 175 ms, límite temporal de este ecograma.

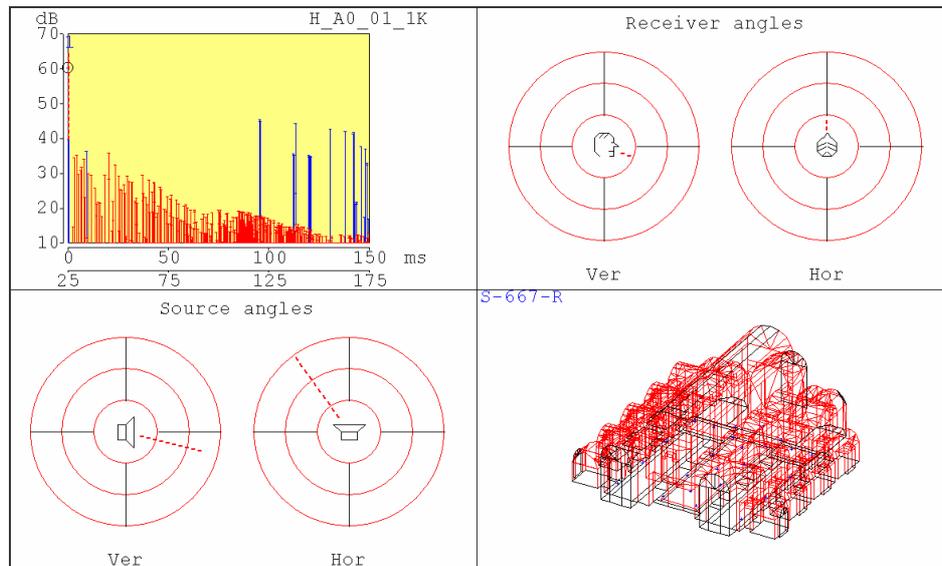


Figura 4.3.- Ecograma (EA)¹¹, frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 01.

En el segundo supuesto de esta geometría, con la fuente "A1", el ecograma del receptor 01 a la misma frecuencia, presenta una distribución de las reflexiones de primer orden totalmente distinta al anterior, como podemos ver en la figura 4.4, con un nivel de presión del sonido directo de alrededor de 46,0

¹¹.- Geometría del Estado Actual

dB, incrementándose hasta un total de 57,3 dB con las primeras reflexiones, lo que nos da una diferencia de 5,2 dB con el nivel generado con la fuente "A0" para este mismo receptor. Esta reducción del nivel de presión se debe, principalmente, a la distancia, puesto que esta se incrementa en unos 39 m.

Otro detalle del ecograma de la figura 4.4 es la una concentración de primeras reflexiones entre los 60 y 90 ms y una cola reverberante con mucha densidad de reflexiones decayendo gradualmente de intensidad.

En este caso el receptor recibe la llegada de un total de 52 rayos sonoros, de las cinco primeras reflexiones consideradas (el número de reflexiones es el mismo para todos los supuestos).

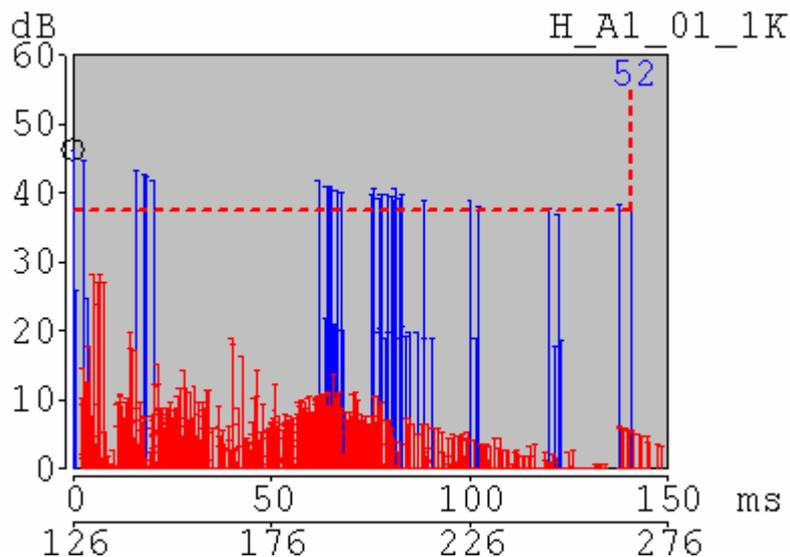


Figura 4.4.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A1 y receptor 01.

En relación a la existencia de ecos en la geometría del estado actual para el receptor número 01, situado en las primeras filas de la audiencia de la nave mayor y la fuente "A0", no detectamos ninguna reflexión con el retraso y nivel de presión sonora suficiente como para que produzcan. Con la segunda fuente o supuesto, entendemos que existe la posibilidad de sufrir ecos, tanto para el uso de la palabra¹² como para la música. En ambos casos aparecen reflexiones posteriores a los tiempos considerados límites con una diferencia de nivel de presión (entre las reflexiones y el sonido directo), inferior a 7,0 dB y 13,0 dB respectivamente. Si bien, la ubicación de la fuente ("A1" coro alto) esta pensada para la música de órgano y polifónica.

¹².- Se considera el límite de 50 ms, para la palabra y 80 ms, para la música.

- **Receptor nº 06**, esta situado hacia el fondo del centro de la audiencia de la nave mayor, a unos 37,50 m de la fuente “A0” y 11,00 m de la fuente “A1”. Al estar situado en el centro de la audiencia tiene visión y sonido directo de ambas fuentes.

Analizando el archivo interactivo “H_A0_06_1K”, de la figura 4.5, podemos ver el ecograma generado por la fuente “A0” para este receptor en la frecuencia de 1KHz y estudiar la trayectoria de los rayos en tres dimensiones, o lo que es lo mismo, ver el camino y los planos en los que impacta cada rayo, así como los ángulos de salida y llegada.

En este ecograma comprobamos que en los primeros ms, se produce la llegada del sonido directo con un nivel de unos 47,0 dB y la primera reflexión del plano de la audiencia (27,0 dB), existiendo un intervalo importante sin ninguna reflexión hasta aproximadamente los 50 ms, que llegan las reflexiones de la puerta principal (44,0 dB) y de la audiencia-puerta (24,0 dB), generándose otro vacío de primeras reflexiones de unos 40 ms. El tercer grupo de reflexiones de segundo, tercer, cuarto y quinto orden, hasta un total de 32 rayos, llega entre los siguientes 90 y 150 ms, todas con un nivel de presión inferior a los 40,0 dB. También podemos comprobar que las reflexiones tardías no superan los 20,0 dB (en rojo) así como su distribución en el intervalo de 111 a 261 ms. Estas reflexiones tienen más importancia para la calidad musical del recinto que para la inteligibilidad.

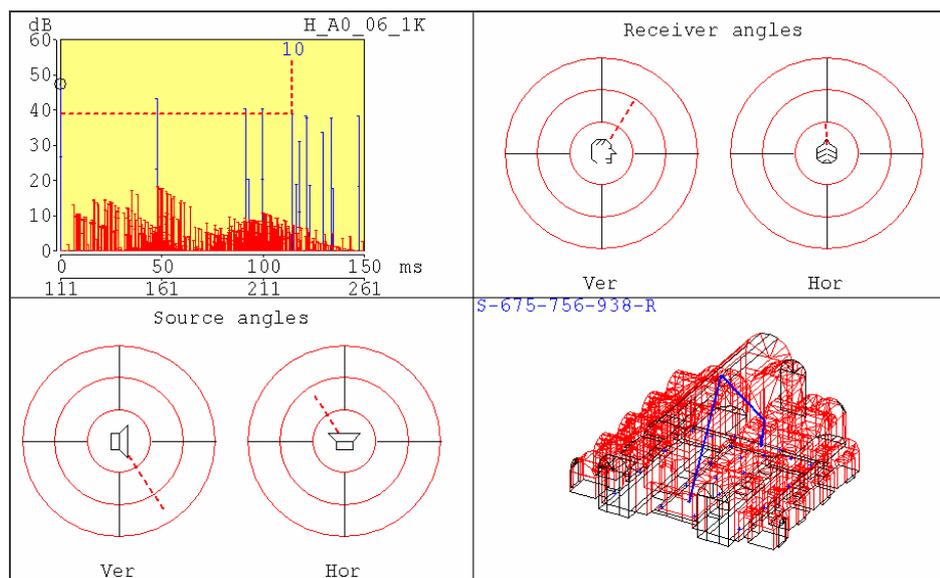


Figura 4.5.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 06.

En el segundo caso del receptor 06, lo analizamos con la misma geometría y la fuente "A1", a la frecuencia fijada, este grafico presenta una distribución de las reflexiones de primer orden totalmente distinta al anterior, como podemos ver en la figura 4.6, lo que confirma la importancia que tiene la ubicación de las fuentes.

En este supuesto el sonido directo llega con un nivel de presión sonora de unos 56,0 dB, incrementándose hasta un total de 60,7 dB este aumento es debido a las primeras reflexiones, lo que nos da una diferencia para esta frecuencia de 5,4 dB con el nivel generado por la fuente "A0", debido, fundamentalmente, a que la distancia que se reduce en unos 26,50 m con la segunda fuente.

El detalle que más nos llama la atención del ecograma de la figura 4.6 es la ausencia de primeras reflexiones entre los 10 y 110 ms, o dicho de otra forma, que las primeras reflexiones, hasta un total de 21, se dividen en dos intervalos separados por 100 ms.

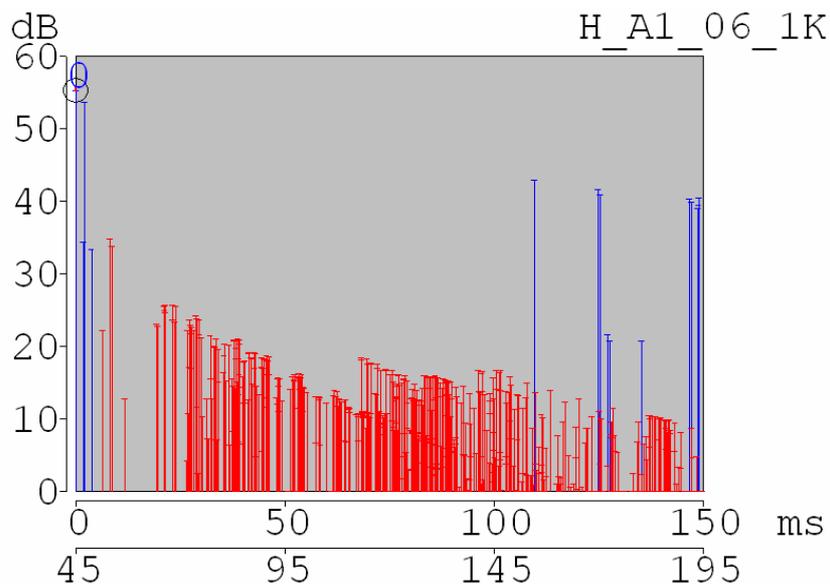


Figura 4.6.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A1 y receptor 06.

En relación a la existencia de ecos, con esta geometría del estado actual, para la posición del receptor número 06 (situado en el centro de las últimas filas de la audiencia de la nave mayor), vemos que con las dos fuentes se detectan reflexiones con el suficiente retraso y nivel de presión como para producir estos. Entendemos que estos dos ecogramas son un claro ejemplo de la existencia de ecos en un recinto (Zona D).

.- **Receptor nº 07**, situado a unos 44,00 m de la fuente “A0” y 6,50 m de la “A1” en esta ocasión sin visión directa de la segunda fuente, como se aprecia en el ecograma de la figura 4.8. En el archivo interactivo “H_A0_07_1K”, de la figura 4.7, podemos ver la distribución de reflexiones y su nivel de presión, generado por la fuente “A0” para este receptor. También podemos analizar la intensidad y la densidad de las reflexiones tardías.

En este ecograma comprobamos que en los primeros 20 ms, se produce la llegada del sonido directo con un nivel de unos 46,0 dB y las 4 primeras reflexiones de los planos más cercanos (cerramiento posterior, pilar y audiencia-pared), existiendo un intervalo importante sin ninguna reflexión hasta la llegada del las reflexiones de las bóvedas y paredes laterales, entre los 90 y 150 ms, todas con un nivel de presión inferior a los 40,0 dB.

El nivel de presión sonora total que recibe el receptor, con la fuente “A0”, para la frecuencia estudiada, es de 56, 5 dB. También podemos comprobar que el nivel de las reflexiones tardías (en rojo) en este caso llegan a los 27,0 dB (150 ms) descendiendo a medida que nos acercamos a los 260 ms.

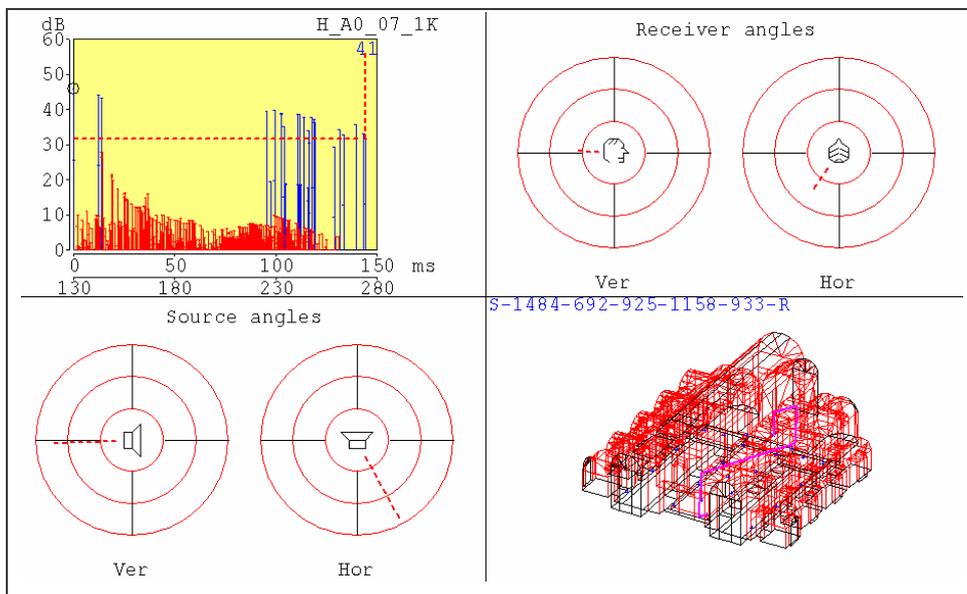


Figura 4.7.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 07.

Con la segunda fuente “A1”, en este mismo recinto, el ecograma del receptor número 07 a la frecuencia mencionada presenta una distribución característica de las malas ubicaciones, debido a las escasas y tardías reflexiones de primer orden, como podemos ver en la figura 4.8 y sin sonido directo. La primera reflexión llega a los 75 ms con unos 46,0 dB, (la más alta del gráfico)

incrementándose con el resto de reflexiones hasta un nivel total de 60,2 dB lo que nos da una diferencia de 3,7 dB con el nivel de presión sonora generado con la fuente "A0".

Lo que más destaca del ecograma de la figura 4.8, es la concentración temporal de 29 de los 31 rayos de las primeras reflexiones entre los 110 y 140 ms, aproximadamente, existiendo un primer intervalo de unos 75 ms, en el que no llega ninguna reflexión al receptor, así como la densidad y el comienzo de las reflexiones tardías, con un nivel máximo de unos 29, dB a partir de los 59 ms decreciendo uniformemente hasta los 189 ms.

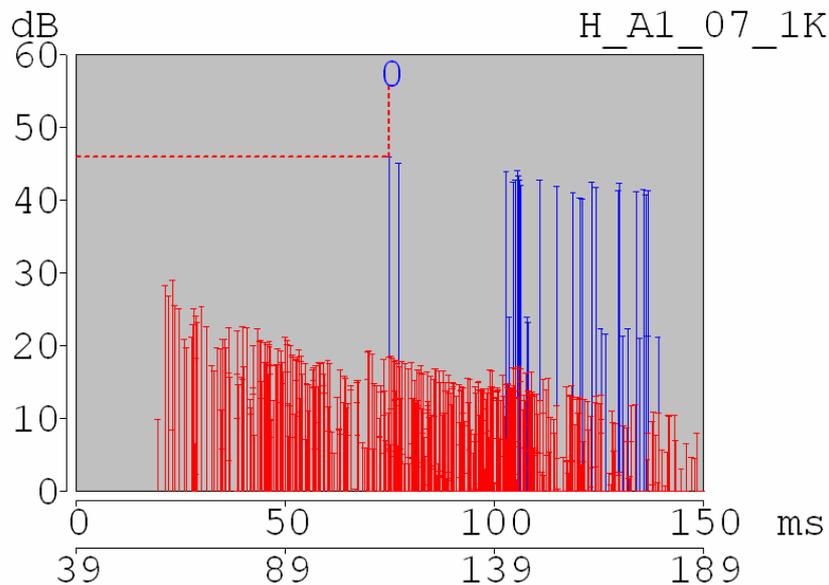


Figura 4.8.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A1 y receptor 07.

En relación a la existencia de ecos, con la geometría del estado actual en el receptor número 07, situado en las últimas filas de la audiencia de la nave central o mayor, entendemos que con la fuente "A0" se pueden producir puesto que existen reflexiones con más de 80 ms de retraso y con menos de 7,0 dB de diferencia. En el segundo supuesto el receptor carece de sonido directo de la fuente, "A1", produciéndose una deslocalización de la misma, debido a que el primer sonido que le llega es una reflexión de primer orden a los 75 ms, incluso después de recibir las reflexiones de orden inferior, que empiezan a llegar a los 59 ms.

- Receptor nº 10, situado al final de la audiencia de la nave menor del lado de la epístola, a unos 19,00 m de la fuente "A0" y 46,50 m de la fuente "A1", al igual que en el caso anterior carece de visión y sonido directo de la segunda fuente.

De este receptor seguimos analizando el trazado de rayos acústicos en el archivo ó ecograma interactivo “H_A0_10_1K”, en la figura 4.9, en el que vemos los resultados del sonido directo y resto de datos a comentar.

En esta ocasión comprobamos que en los primeros ms, se produce la llegada del sonido directo al receptor con un nivel de unos 54,0 dB y la primera reflexión del plano de la audiencia a 33,0 dB existiendo un intervalo importante sin ninguna reflexión hasta pasados los 50 ms, en el que se recibe un segundo grupo o intervalo de primeras reflexiones, de segundo, tercer, cuarto y quinto orden que llegan entre los 60 y 70 ms, con un nivel de presión inferior a los 46 dB. Existiendo un tercer grupo entre los 120 y 135 ms, (40,0 dB) hasta un total de 14 rayos sonoros.

También podemos comprobar que las reflexiones tardías o de orden inferior no superan los 30 dB (en rojo). Estas tienen una distribución sensiblemente decreciente del nivel presión.

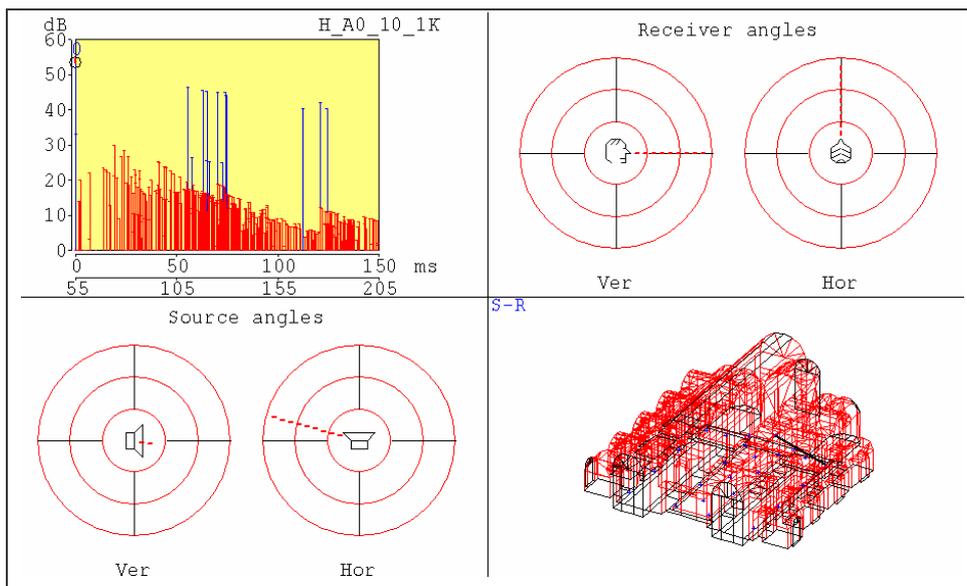


Figura 4.9.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 10.

En el segundo supuesto que analizamos con la misma geometría y la fuente “A1” el ecograma del receptor número 10, como en los casos anteriores a la frecuencia fijada de 1000 Hz, presenta unas características muy peculiares, sin sonido directo y la llegada de las primeras reflexiones (42,0 dB) a partir de los primeros 20 ms. (Figura 4.10).

En este supuesto el nivel total de presión sonora medido en el receptor es de unos 54,0 dB, generado por las primeras reflexiones. Un detalle que nos llama

la atención del ecograma de la figura 4.10, es la distribución, en pequeños grupos, de las 24 primeras reflexiones recogidas entre los 25 y 140 ms, con un nivel máximo de unos 43,0 dB en este intervalo así como la escasa entidad de las reflexiones tardías que en ningún caso superan los 18,0 dB a diferencia de las producidas por la fuente "A0".

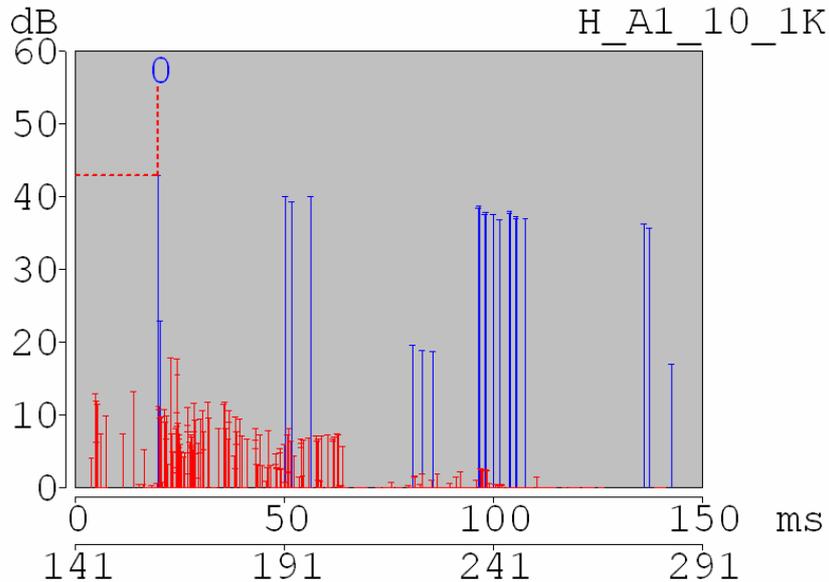


Figura 4.10.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A1 y receptor 10.

En relación a la existencia de ecos y después de analizar los datos del primer ecograma de receptor número 10, vemos que con la primera fuente "A0", se detectan reflexiones con el suficiente nivel y retaso como para que estos se produzcan¹³. En el segundo supuesto, al igual que en el caso anterior, carece de sonido directo de la fuente "A1", produciéndose una deslocalización de la misma, debido a que el primer sonido que le llega es una reflexión de primer orden a los 25 ms.

.- Receptor nº 12, situado fuera de las zonas de audiencia, en la nave menor del lado de la epístola a la entrada de la Capilla de San Pedro, a una distancia de unos 36,00 m de la fuente "A0" y 25,00 m de la fuente "A1" careciendo de visión y sonido directo de las dos fuentes consideradas en esta geometría.

En el ecograma interactivo de este receptor "H_A0_12_1K" de la figura 4.11 (que es el único que empieza con un nivel de -10,0 dB) podemos apreciar que

¹³ .- La diferencia es de -7 dB a los 60 ms, con lo que nos encontramos en la zona D: La reflexión es percibida como un eco y disminuye la inteligibilidad.

la primera reflexión de segundo orden, la recibe pasados los primeros 70 ms y tiene un nivel de 42,0 dB llegando a un total de 56,1 dB con la fuente "A0". En este ecograma también podemos ver que carece de reflexiones de primer orden, con lo que el sonido que llega al receptor ha tenido más de un cambio de dirección, siendo el número total de 8 rayos sonoros.

Otro dato que destacamos de las reflexiones tardías o cola reverberante es que no superan los 20,0 dB (en rojo) y estas tienen una densidad superior a las primeras reflexiones.

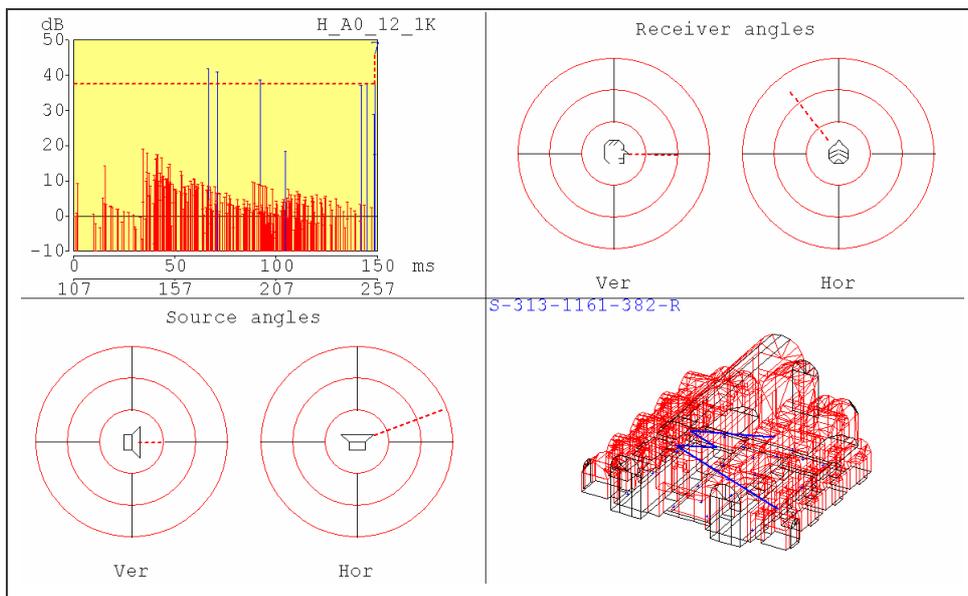


Figura 4.11.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 12.

En el segundo supuesto que estudiamos para este receptor, con la misma geometría y la fuente "A1" presenta un nivel máximo en las primeras reflexiones de segundo orden de 46,0 dB y estas llegan a partir de los primeros 30 ms. (Figura 4.12)

En este supuesto el nivel total llega a los 56,1 dB generado exclusivamente por las primeras reflexiones, lo que nos da una diferencia, para esta frecuencia, de 4,0 dB (con el nivel total generado por la fuente "A0"). En el ecograma de la figura 4.12, vemos la distribución de las 45 primeras reflexiones (o rayos sonoros que llegan a este receptor), recogidas entre los 30 y 150 primeros ms, con un nivel máximo de unos 46,0 dB así como la concentración de las reflexiones tardías en el sector comprendido entre los 82 a 132 ms y la escasa entidad de estas a partir de los 132 ms que en ningún

caso superan los 31,0 dB a diferencia de las producidas por la fuente "A0" que no superan los 20,0 dB.

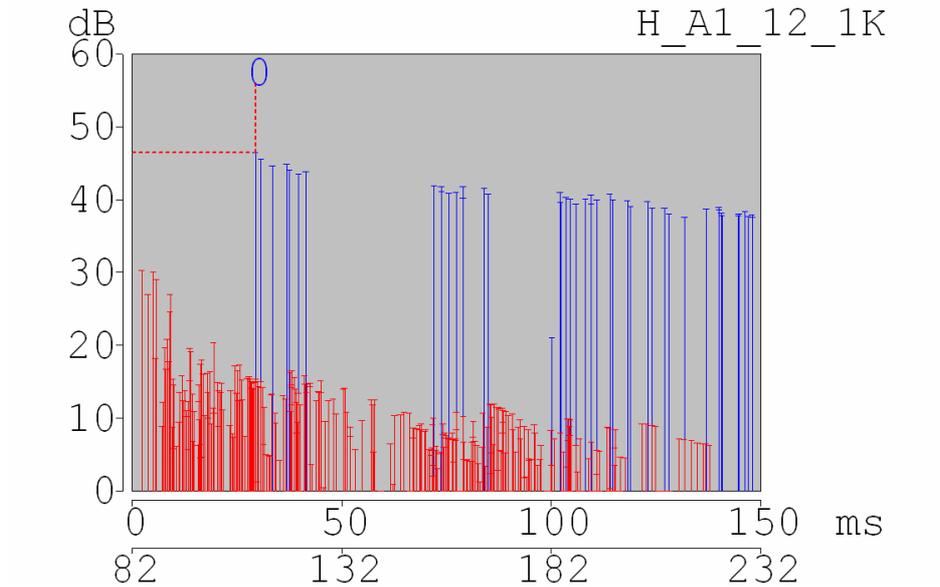


Figura 4.12.- Ecograma (EA), frecuencia 1000 Hz. Fuente A1 y receptor 12.

En estos dos supuestos el receptor número 12, carece de sonido directo, produciéndose la deslocalización de las fuentes, debido a que el primer sonido que le llega es una reflexión de primer orden a los 30 ms con la fuente sonora "A1" y con la "A0" a los 75 ms.

Otro de los archivos generados por el programa de simulación, para cada frecuencia, es el de la dirección de la llegada del sonido a los receptores, a modo de ejemplo exponemos en la figura 4.13.

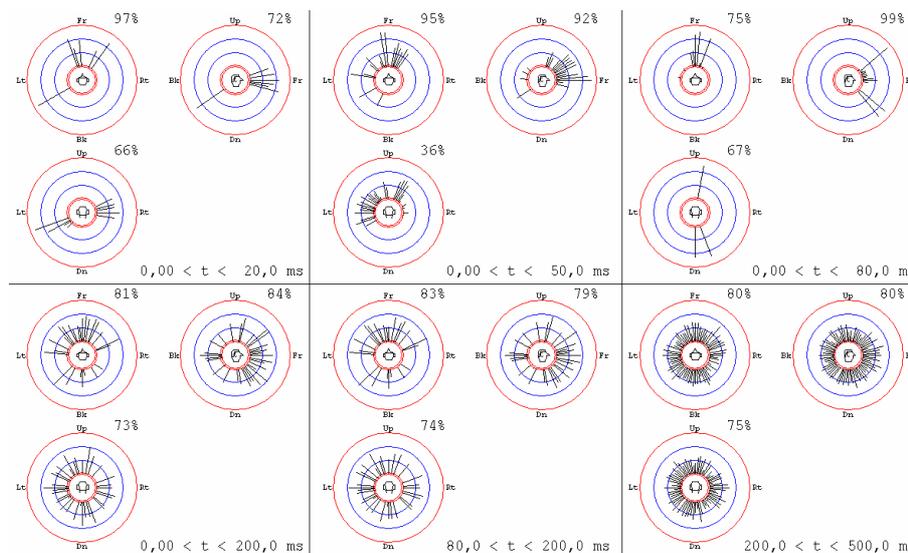


Figura 4.13.- Gráfico de llegada del sonido en los primeros 500 ms, frecuencia 1000 Hz. Fuente A1 y receptor 12.

4.2.2 ANALISIS DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS EN LA ZONA DE AUDIENCIA CON LA GEOMETRIA DEL ESTADO ACTUAL

En los siguientes mapeados bidimensionales¹⁴ podemos apreciar las tendencias y degradación de cada parámetro por frecuencias, así como los contrastes entre las diferentes zonas de la audiencia considerada de la catedral, sin llegar a valores exactos. Los valores numéricos se presentan en los archivos de texto denominados “E_A0_01.TXT”.

Para comentar estos mapas coloreados de los parámetros que caracterizan la respuesta acústicas de la catedral, mantenemos la división de estos en los cuatro grupos considerados: temporales, energéticos, espaciales y de inteligibilidad.

Como valores orientativos, sin ser ningún objetivo acústico, podemos recordar algunos de los recomendados por Beranek¹⁵ para el “*Concer & Opera Halls. How they sound*” que son: **RT**. Salas destinadas a Órgano y canto coral (como es el caso): 1,8 a 3,2 (s). **SPL**. Valores > a 60 dB. **G**. Entre 4 y 5,5 dB. **C-80**. Entre -4 y 0 dB, y **LF**. Valores > al 19 %.

.- Temporales, el programa facilita los datos de cinco parámetros temporales globales (Tabla 4.02), más los Ts, EDT, T-15 y T-30 de cada receptor, para cada una de las 6 frecuencias consideradas, cuya tendencia general podemos ver en la figura 4.14.

Frecuencia	125 Hz.	250 Hz.	500 Hz.	1 kHz.	2 kHz.	4 kHz.
T-15 [s]	3,80	3,84	3,44	3,03	2,73	2,00
T-30 [s]	3,99	3,98	3,79	3,27	3,07	2,07
EyrT [s]	3,23	3,39	3,15	2,84	2,58	1,95
EyrTg[s]	3,22	3,38	3,19	2,90	2,64	1,99
SabT [s]	3,44	3,60	3,40	3,10	2,80	2,07

Tabla 4.02.- Parámetros temporales globales por frecuencias, con la geometría del estado actual.

Fuente A0, en segundos.

En la figura 4.14, podemos ver que el intervalo de valores es muy amplio, puesto que estos tiempos oscilan entre 0,9 y 3,9 (s), superando ampliamente los valores recomendados por Beranek (1,8 a 3,2 s) que son los adecuados

¹⁴ .- El programa de simulación también nos puede proporcionar estos gráficos en tres dimensiones pero entendemos que es mucho más claro las 2 dimensiones.

¹⁵ .- Leroy Leo Beranek, experto en acústica, doctorado por la Universidad de Harvard. En la edición de 2004 de su libro “ACÚSTICA”, estudia más de 100 salas, habiendo participado en el diseño de numerosas salas de conciertos y óperas.

para recintos destinados a la música de órgano y canto coral. El alto tiempo de reverberación que presenta en la mayoría de las zonas de la audiencia este modelo del estado actual, es debido al gran volumen del recinto catedralicio estudiado ($56.850,00 \text{ m}^3$) y la reverberación.

RT' [s] 1 kHz

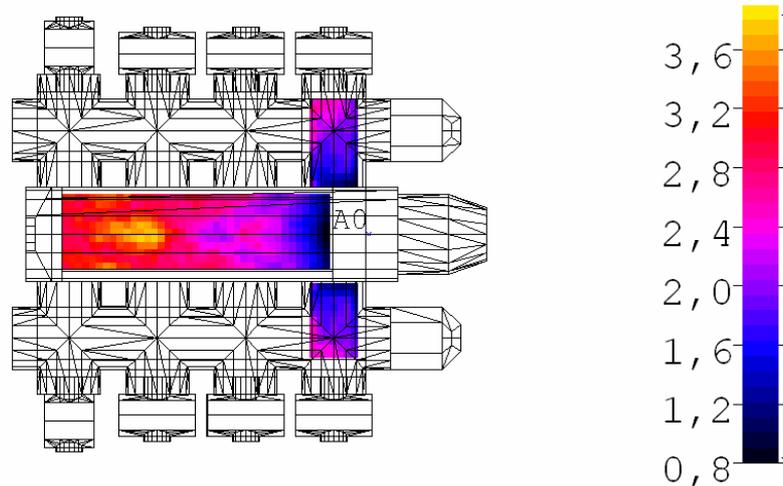


Figura 4.14.- Planta del tiempo de reverberación para la zona de audiencia, estado actual.
Frecuencia de 1KHz. Fuente A0.

.- Los parámetros energéticos considerados son: el **SPL**, (nivel de presión sonora), **G** (sonoridad), **C-80** (claridad musical) y **C-50** (definición), como en el caso anterior, en las figuras 4.15 y 4.16 podemos observar la tendencia de la distribución energética en la zona de audiencia, apreciando una cierta similitud entre la tendencia de las dos representaciones.

SPL [dB] 1 kHz

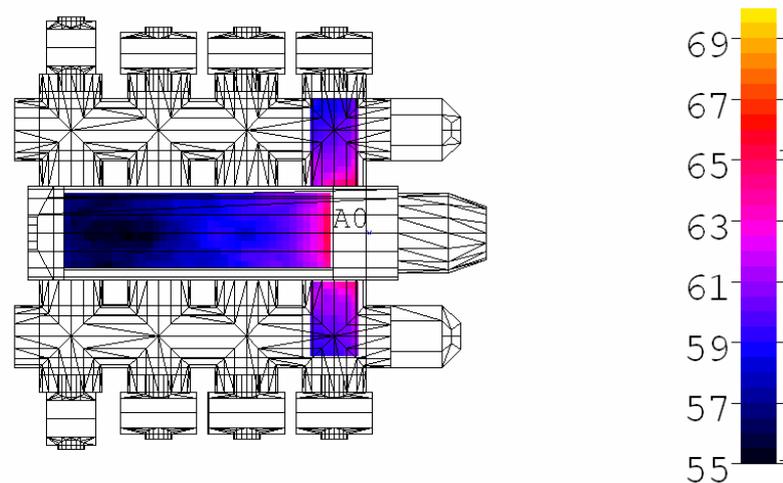


Figura 4.15.- Representación en 2D de la zona de audiencia del SPL para la frecuencia 1000 Hz.
Con la fuente A0, en presbiterio.

El intervalo del nivel de presión sonora en la zona de la audiencia para esta fuente "A0", a la frecuencia de 1.000 Hz es de 56,0 a 66,0 dB como podemos comprobar en la figura anterior, donde solo una zona cercana a la fuente supera los 60,0 dB recomendados por Beranek.

Para los valores globales de G, el mapa coloreado presenta un amplio intervalo que va de -4,0 a 7,0 dB, (figura 4.16) superando amplia mente las recomendaciones iniciales de entre 4,0 y 5,5 dB. Lo que nos indica que el recinto necesita correcciones importantes para uniformar este parámetro en la zona de la audiencia, como hemos visto también en los ecogramas estudiados.

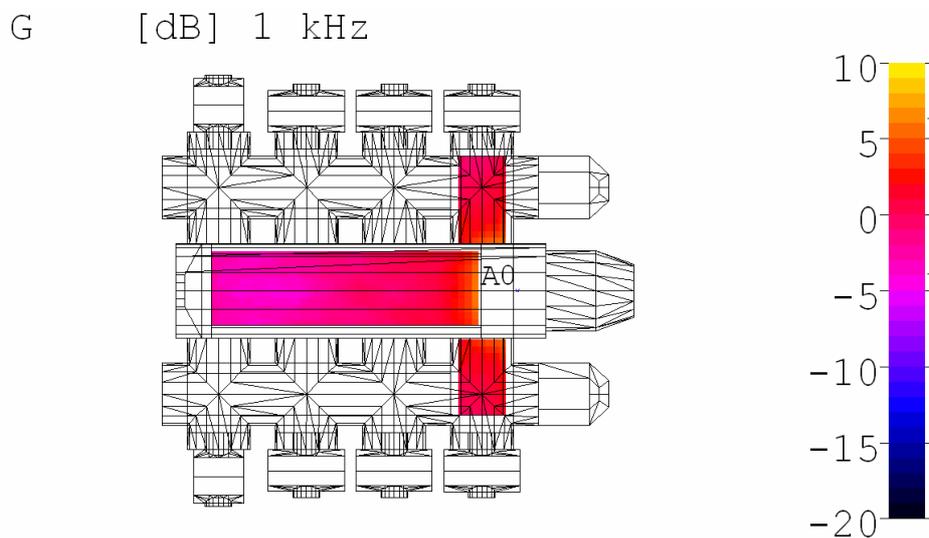


Figura 4.16.- Planta¹⁶ coloreada de la sonoridad (G) para la frecuencia 1000 Hz. Fuente "A0".

Las tendencias apuntadas por los colores de los mapas de los índices de definición D-50 y D-80 de claridad musical, también coinciden con los de los dos anteriores, presentando unos intervalos, similares, de -7 a 5 dB cuando el intervalo recomendados es entre -4,0 y 0,0 dB.

.- En este caso, para medir la impresión espacial del sonido, el parámetro que estudiamos son las reflexiones laterales (LF). Observando la figura 4.17 vemos que predomina el color negro, lo que nos indica unos valores muy pobres, en la mayoría de la zona de audiencia, inferiores al 19 %.

¹⁶.- Realmente no es una sección de la planta, como estamos acostumbrados a ver, sino una vista superior del modelo, entendemos que con una sección de la planta la distribución de colores se entendería mejor.

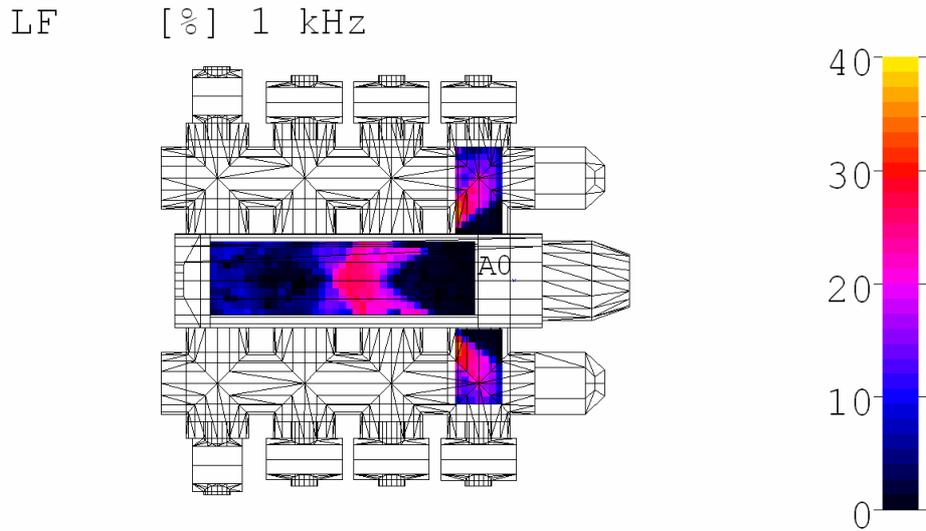


Figura 4.17.- Planta de la eficiencia lateral para la frecuencia 1000 Hz. Fuente "A0" en presbiterio.

Estos mapas coloreados nos indican que las reflexiones que dominan en la zona de audiencia son distintas a las laterales. También podemos ver las zonas de la audiencia en la que los valores son superiores al 19 %, zona central de la nave mayor y parte de las naves laterales.

- Parámetros de inteligibilidad, como podemos comprobar en la figura 4.18, la zona cercana a la fuente es buena, degradándose a medida que nos separamos de esta, como en casi todos los parámetros energéticos vistos anteriormente. El programa nos mide este índice con y sin ruido de fondo, existiendo muy pocas diferencias entre los gráficos de los dos supuestos.

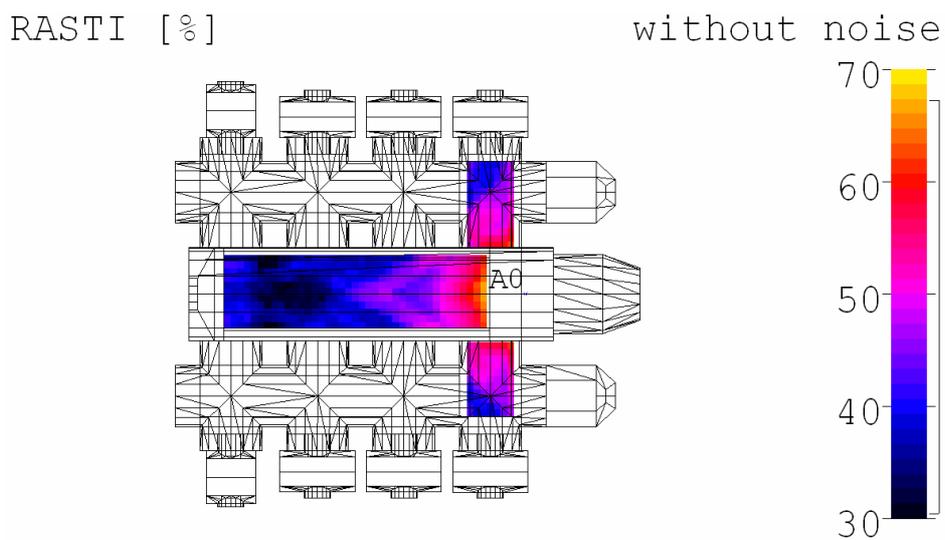


Figura 4.18.- RASTI, frecuencia 1000 Hz. Fuente "A0", en presbiterio.

4.3.- ANALISIS DE LA SIMULACIÓN CON EL CORO BAJO

Con la segunda geometría supuesta del coro bajo, los receptores que consideramos son: **01** (primeras filas de la audiencia de la nave mayor), **05** (sitial del coro desaparecido), **10** (últimas filas de la audiencia del nave del lado de la epístola) y **12** (entrada de la Capilla de San Pedro). Coincidiendo con la posición de los receptores del primer supuesto, es por lo que en estos casos nos limitaremos a estudiar el ecogramas generados únicamente por la fuente sonora “A2” puesto que con la fuente sonora “A0” ya los hemos visto, en el supuesto estudiado con la geometría del estado actual, excepto en el receptor nº 5, en el que analizaremos los ecogramas generados por las dos fuentes sonoras consideradas para esta geometría (“A0” y “A2”). También estudiaremos como en los dos primeros supuestos, los parámetros acústicos considerados de la zona de la audiencia (temporales, energéticos, espaciales y de inteligibilidad).

4.3.1 ACÚSTICA GEOMÉTRICA

- **Receptor nº 01**, en este caso, con la primera fuente sonora “A0”, no se detectan diferencias sustanciales entre los ecogramas de las dos geometrías (la estudiada del estado actual y la del coro bajo), únicamente pequeñas diferencias en el nivel de presión total del receptor, es por lo que mantenemos el análisis anterior de este receptor con esta fuente, figura 4.3.

En el cuarto supuesto que comentamos con la geometría del coro bajo y la fuente “A2” vemos que el receptor número 01, a la frecuencia de estudio, no tiene llegada de sonido directo y presenta un nivel máximo en las primeras reflexiones de segundo orden de 46,0 dB a partir de los primeros 30 ms. Figura 4.19.

En este supuesto el nivel total del sonido es de 57,8 dB generado exclusivamente con las primeras reflexiones, lo que nos da una diferencia para esta frecuencia, de 4,9 dB con el nivel generado por la primera fuente “A0”, debido a la distancia.

En el ecograma de la figura 4.19, vemos que la mayor concentración de primeras reflexiones se encuentra entorno a los 130 ms, con un nivel de unos 40 dB, así como la distribución de las reflexiones tardías, que en ningún caso

superan los 25,0 dB a diferencia de las producidas por la fuente sonora “A0” en el que las máximas rondan los 37,0 dB.

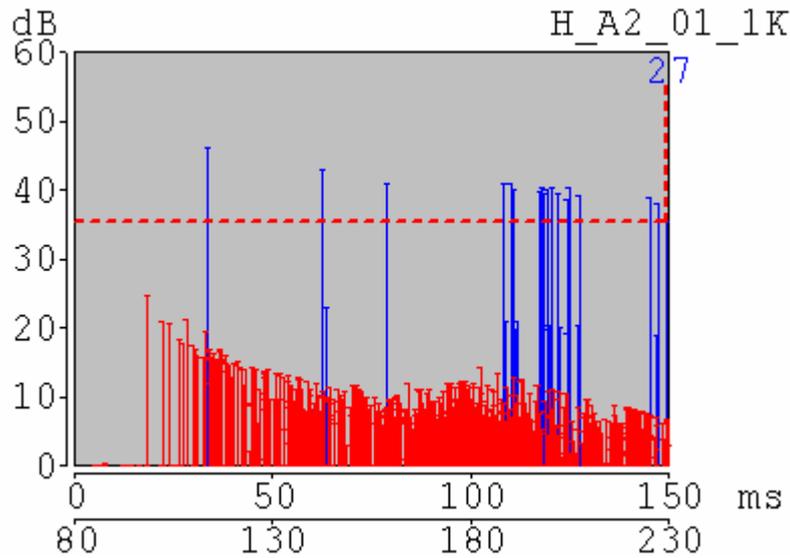


Figura 4.19.- Ecograma (CB), frecuencia 1000 Hz. Fuente A2 y receptor 01.

.- **Receptor nº 05**, situado en un sitial del coro bajo, fuera de la zona de audiencia de la nave mayor, a unos 31,00 m de la fuente “A0” y 3,00 m de la fuente “A2” pero sin visión ni sonido directo de esta (cuarto supuesto).

De este receptor seguimos analizando el trazado de rayos en el archivo ó ecograma interactivo “H_A0_05_1K”, en la figura 4.20, en el que podemos ver los resultados de las reflexiones que llegan generadas por la fuente “A0” para la frecuencia media escogida, así como la trayectoria y los planos en los que impactan los rayos sonoros.

En este caso para la fuente “A0”, a la frecuencia de estudio, comprobamos que en los primeros ms, se produce la llegada del sonido directo con un nivel de unos 49,0 dB y las primeras reflexiones del suelo, pilares y cerramiento del supuesto coro bajo hasta un total de 53 rayos sonoros, manteniendo por lo general, un nivel de presión de unos 40,0 dB lo que supone un nivel total de presión sonora para este receptor, en este supuesto, de 60,3 dB.

También podemos comprobar que las reflexiones tardías o de orden inferior no superan los 28 dB (en rojo). Estas tienen una distribución decreciente bastante uniforme hasta los 242 ms considerados en el ecograma. Figura 4.20.

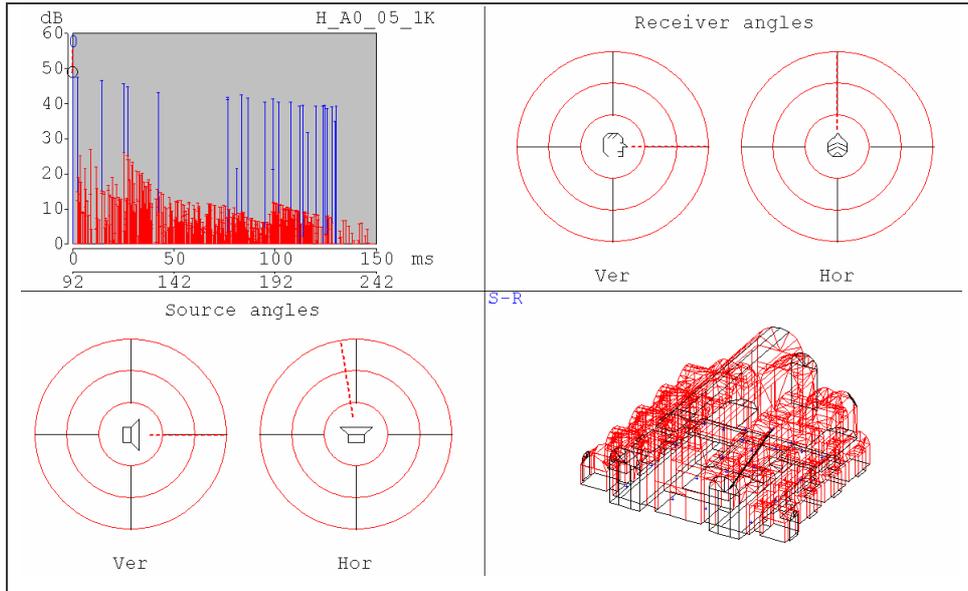


Figura 4.20.- Ecograma (CB), frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 05.

En el otro supuesto que analizamos, con la geometría desaparecida de coro bajo, para este receptor y la fuente “A2”, vemos que no recibe sonido directo y la primera reflexión con un nivel de unos 49,0 dB que llega a partir de los primeros 50 ms. (Figura 4.21).

En este caso el nivel total es de 63,8 dB generado exclusivamente por las primeras reflexiones, es el más alto de todos los analizados y como hemos comentado, sin sonido directo.

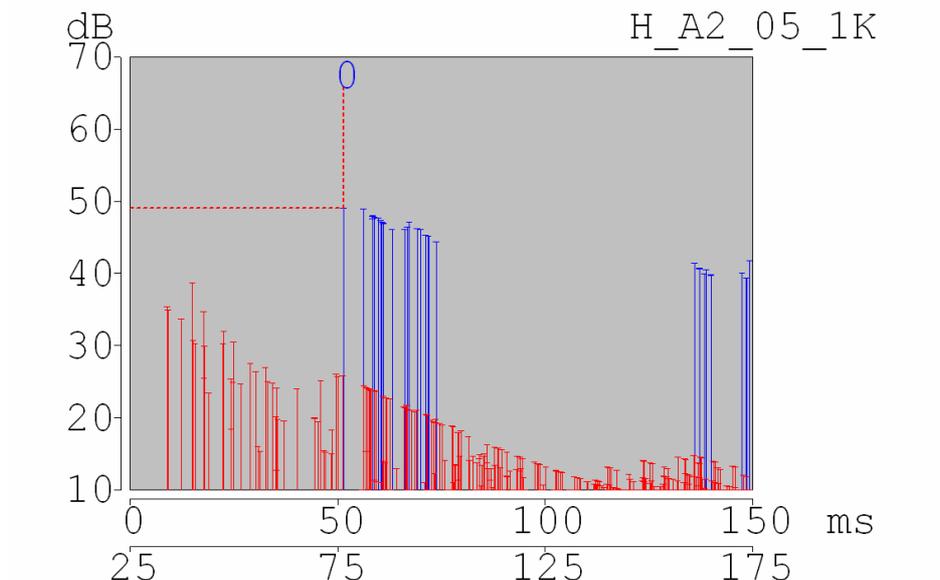


Figura 4.21.- Ecograma (CB), frecuencia 1000 Hz. Fuente A2 y receptor 05.

En este ecograma vemos que las primeras reflexiones (32 rayos), se dividen en dos grupos claramente diferenciados.

En relación a la existencia de ecos y después de analizar los datos del primer ecograma de receptor número 05, situado en un sitio del coro bajo vemos que con la primera fuente "A0", se detectan reflexiones con el suficiente nivel y retaso como para que estos se produzcan. En el segundo supuesto, carece de sonido directo de la fuente "A2", produciéndose la comentada deslocalización de la fuente, debido a que el primer sonido que le llega es el de una primera reflexión de segundo orden pasados los primeros 50 ms, incluso después de la llegada de las primeras reflexiones tardías (39,0 dB) a los 35 ms.

- Receptor nº 10, en este tercer supuesto con la primera fuente "A0", las diferencias detectadas entre las dos geometrías no son sustanciales (figura 4.22), es por lo que, como en los otros casos, mantenemos el análisis realizado para este receptor en el primer supuesto con esta fuente en el apartado 4.2, figura 4.9.

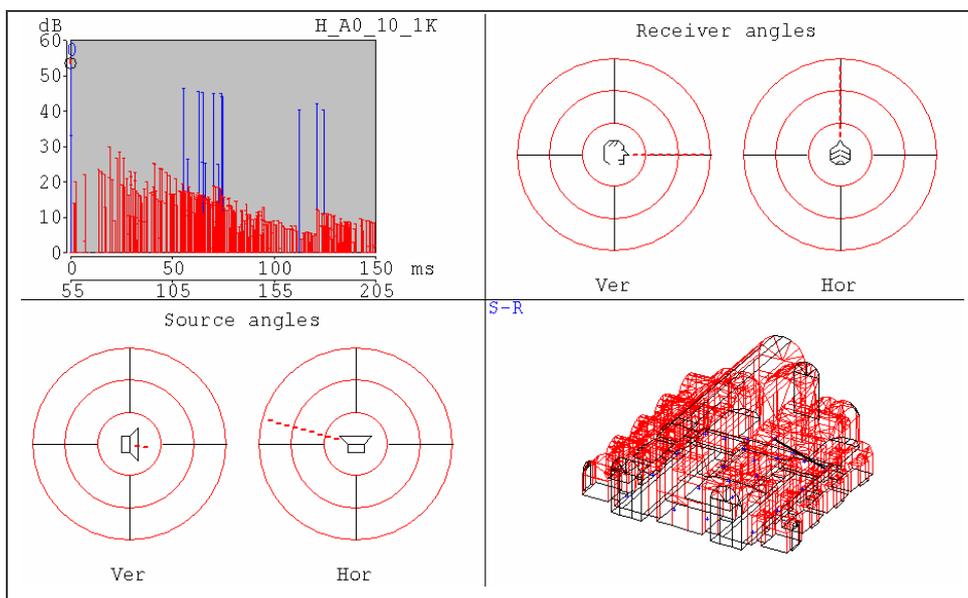


Figura 4.22.- Ecograma (CB), frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 10.

También podemos comprobar que las características de las reflexiones tardías en ambos supuestos se mantienen, no superando los 30,0 dB así como una distribución similar.

En el cuarto supuesto que analizamos con la misma geometría desaparecida y la fuente “A2” el ecograma de este receptor presenta la llegada de las primeras reflexiones (40,0 dB) a partir de los primeros 90 ms, sin sonido directo (Figura 4.23).

El nivel total que recibe este receptor es de de 54,8 dB, debido a las escasas reflexiones de primer orden recibidas (6) todas ellas por debajo de los 40,0 dB como podemos ver en el ecograma de la figura 4.23, así como la escasa entidad de estas. En cuanto a las reflexiones tardías, con más densidad, estas se concentran entre los 141 y 241 ms y en ningún caso superan los 15,0 dB, a diferencia de las producidas por la fuente “A0” que tienen mayor nivel de presión.

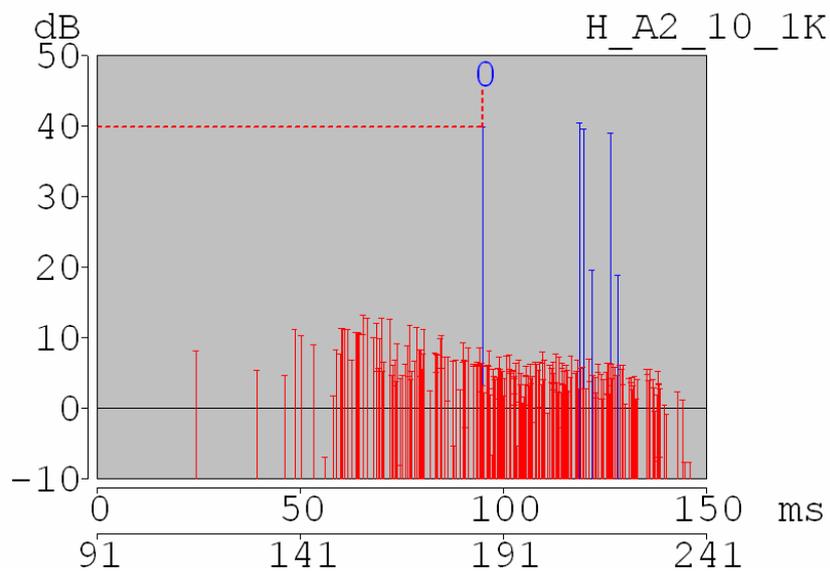


Figura 4.23.- Ecograma (CB), frecuencia 1000 Hz. Fuente A2 y receptor 10.

En relación a la existencia de ecos en la posición del receptor número 10, con esta geometría, al igual que en los dos primeros supuestos se repite el razonamiento y análisis, detectándose reflexiones con el suficiente nivel y retaso como para que estos se produzcan y en el cuarto supuesto carece de sonido directo de la fuente, “A2”, produciéndose una deslocalización de la misma, debido a que el primer sonido que le llega es una primera reflexión de quinto orden pasados los 90 ms.

- **Receptor nº 12**, las diferencias detectadas entre las dos geometrías consideradas para este receptor y la fuente “A0” no son significativas como en los anteriores supuestos mantenemos los mismos análisis.

Este receptor es uno de los casos más extremos, puesto que no recibe sonido directo de ninguna de las fuentes consideradas y apenas, primeras reflexiones (8 rayos sonoros de la "A0").

En estos casos lo que hemos comparado son los ecogramas interactivos "H_A0_12_1K.PLT", de la figura 4.24 con el de la figura 4.11, ambos generados por la fuente "A0" y los listados "E_A0_012_1K.TXT", para la frecuencia de estudio.

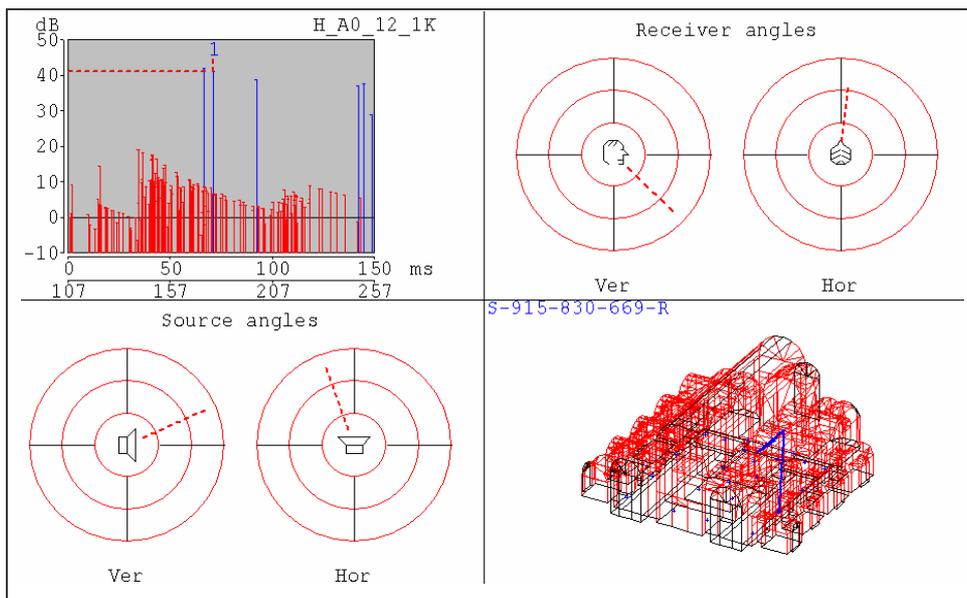


Figura 4.24.- Ecograma (CB), frecuencia 1000 Hz. Fuente A0 y receptor 12.

En el cuarto supuesto el programa no genera el archivo "H_A2_12_1K.PLT", a pesar de tener activado el receptor en la simulación. El motivo de no generar este archivo es que en los primeros 150 ms no llega ninguna reflexión, como comprobamos en el ecograma completo de la figura 4.25. "E_A0_12_1K.PLT", en el que podemos analizar todo el intervalo de los 4.000 ms, con esta geometría para este receptor.

En nivel de sonido total recibido es de unos 57,0 dB lo que supone una diferencia, para esta frecuencia de 1,3 dB con el nivel generado por la fuente "A0" debido principalmente a la ubicación de las fuentes.

En la figura 4.25 del archivo "E_A0_12_1K.PLT", podemos ver varios ecogramas, "Complete echogram" ecograma de todo el tiempo considerado, "Early echogram" ecograma de los 250 primeros ms para las primeras reflexiones y 291 ms, para la cola reverberante, también vemos el "Early

directional echograms” ecograma direccional. Se incluye también un grafico de la planta (escalada) con la ubicación de la fuente y el receptor, algunas de las características de la fuente así como un resumen de los 10 parámetros más característicos medidos en el receptor para la frecuencia de 1.000 Hz.

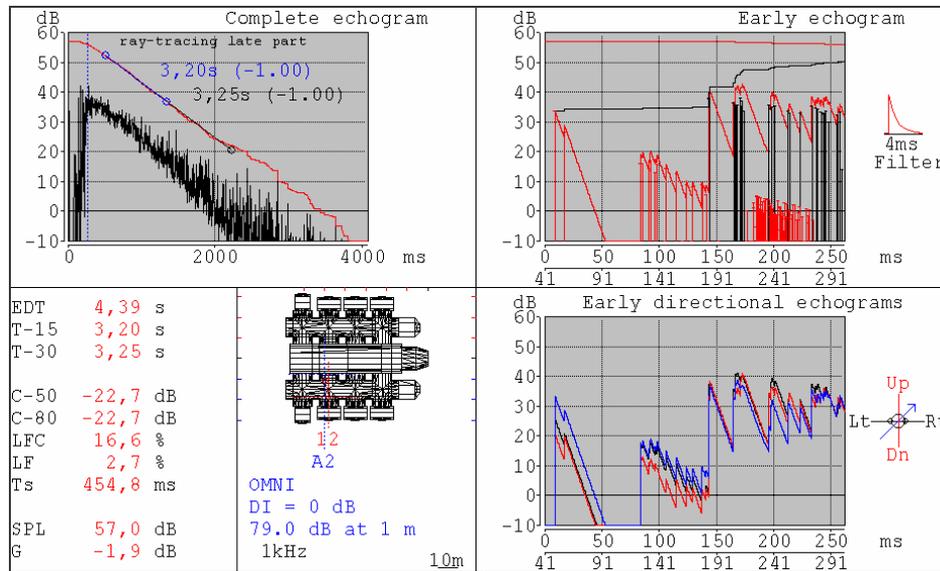


Figura 4.25.- Ecograma (CB), frecuencia 1000 Hz. Fuente A2 y receptor 12.

En relación a la existencia de ecos y después de analizar todos los datos recogidos en los ecogramas de este receptor y puesto que carece de sonido directo, en ambos supuestos, lo que entendemos se produce es la deslocalización de la fuente.

Terminado el análisis de los ecogramas de los receptores considerados más significativos de la sala (01, 05, 06, 07, 10 y 12) adjuntamos una tabla 4.03, en la que resumimos algunos de los datos más significativos de estos supuestos, a la frecuencia de 1.000 Hz, para cada una de las cuatro combinaciones posibles de cada receptor (dos del estado actual y dos con la geometría del coro bajo), en la que se exponen los datos de los niveles de presión acústica total (SPL), del sonido directo (SD) y máximo de la cola reverberante (Tard.), el número de primeras reflexiones que llegan a cada receptor en los primeros 150 ms, la distancia aproximada de este a la fuente y la posible existencia de ecos o de deslocalización de esta, cuando no recibe sonido directo.

En esta tabla comprobamos que la diferencia del nivel de presión sonora total (SPL) debida a la geometría, en todos los receptores considerados, con la misma fuente, no supera los 0,40 dB.

También detectamos, como cabía esperar, zonas D ó zonas con ecos.

REC.	GEOM.	FUENT.	SPL (total) dB	SPL (SD)dB	Nº RAYOS	SPL. dB (Tard.)	DIST.(m)	ECOS
1	Est. Act.	A0	62,5	60,0	25	37,0	9,00	No
	Est. Act.	A1	57,3	46,0	52	38,0	48,00	Si
	C. Bajo	A0	62,7	60,0	25	37,0	9,00	No
	C. Bajo	A2	57,8	---	27	25,0	24,00	DES.
5								
	C. Bajo	A0	60,3	49,0	53	28,0	31,00	SI
	C. Bajo	A2	63,8	---	32	39,0	3,00	DES.
6	Est. Act.	A0	55,3	47,0	32	20,0	37,50	SI
	Est. Act.	A1	60,7	46,0	21	35,0	11,00	SI
7	Est. Act.	A0	56,5	46,0	41	27,0	44,00	SI
	Est. Act.	A1	60,2	---	31	29,0	6,50	DES.
10	Est. Act.	A0	60,0	54,0	14	30,0	19,00	SI
	Est. Act.	A1	54,3	---	24	18,0	46,00	DES.
	C. Bajo	A0	59,7	53,0	14	30,0	19,00	SI
	C. Bajo	A2	54,8	---	6	13,0	27,50	DES.
12	Est. Act.	A0	56,1	---	8	19,0	36,00	DES.
	Est. Act.	A1	60,8	---	45	30,0	25,00	DES.
	C. Bajo	A0	55,7	---	5	19,0	36,00	DES.
	C. Bajo	A2	57,0	---	---	33,0	12,00	DES.

Tabla 4.03.- Resumen de los ecograma analizados, para la frecuencia de 1.000 Hz.

4.3.2 ANALISIS DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS EN LA ZONA DE AUDIENCIA CON LA GEOMETRÍA DE CORO BAJO

Al igual que con la geometría del estado actual pasamos a estudiar los mapas coloreados generados para el segundo modelo considerado en esta memoria.

.- Temporales. A la vista de la figura 4.26 comprobamos que el intervalo de valores obtenido es muy amplio, puesto que estos tiempos oscilan entre 2,0 y 5,4 (s), superando el recomendado por Beranek (1,8 a 3,2 s). Intervalo más amplio que en el primer supuesto (0,9 a 3,2).

De las tres zonas de audiencia consideradas en este supuesto, el tiempo de reverberación más alto lo presenta la ubicada en la nave de la epístola (4,0 – 5,4 s) mientras que el intervalo de la zona de audiencia de la nave mayor y nave del evangelio se sitúa entre 2,0–4,0 segundos.

$RT' [s] \ 1 \text{ kHz}$

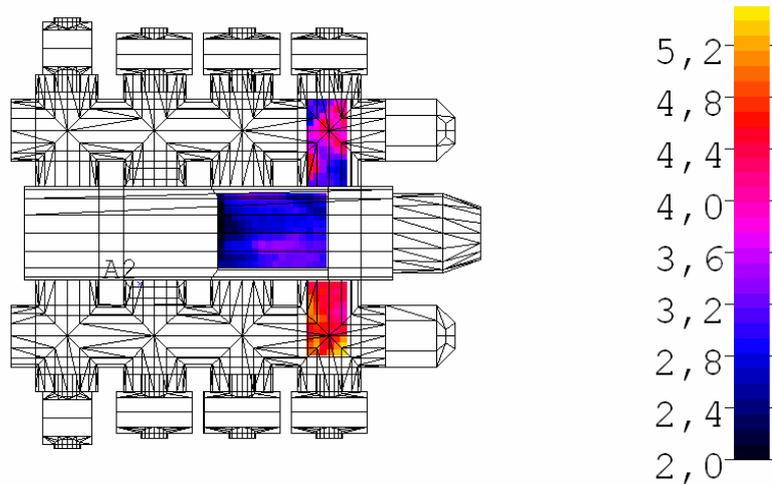


Figura 4.26.- Tiempo de reverberación para la zonas de audiencia (CB), para la frecuencia de 1KHz. Fuente A2.

.- Los parámetros energéticos que analizamos en este segundo caso (al igual que en el primero), son: el **SPL**, (nivel de presión sonora), **G** (fuerza acústica), y **C-80** (claridad musical), en las figuras 4.27 y 4.28 podemos observar la tendencia de la distribución energética en la zona de la audiencia, apreciando grandes diferencias entre las dos representaciones debido a la ubicación de la fuente "A2".

SPLdir [dB] 1 kHz

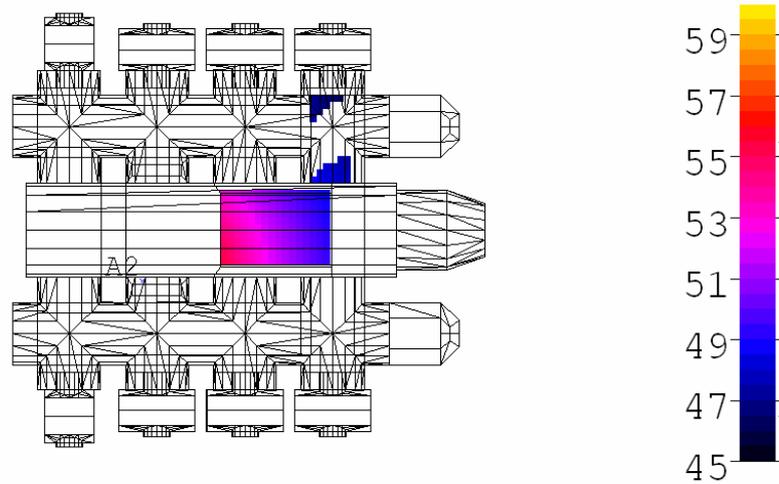


Figura 4.27.- Zonas de audiencia del SPL para la frecuencia 1000 Hz. Con la fuente A2 (CB).

Los valores globales de la sonoridad calculados en la simulación (**G**), varían en un intervalo que va de -4 a 4 dB, y difieren bastante de los recomendados (4,0 a 5,5 dB) entendiéndose que en este influyen la distancia, la geometría de la sala, las primeras reflexiones y la superficie de la audiencia.

G [dB] 1 kHz

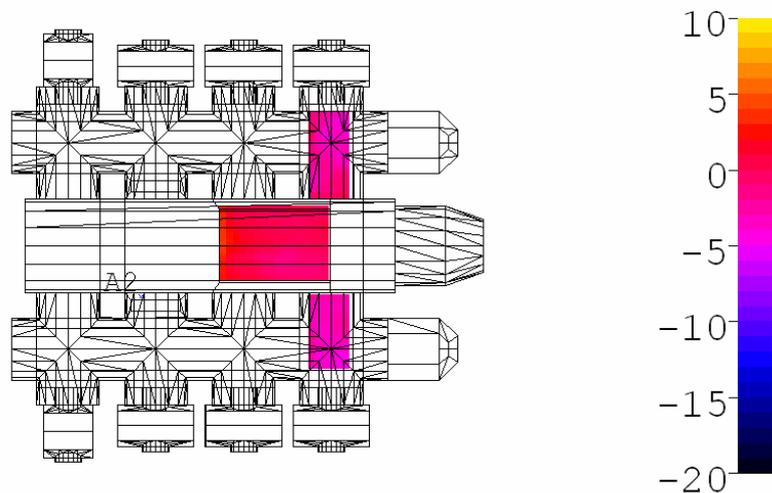


Figura 4.28.- Planta de la sonoridad (G) para la frecuencia 1000 Hz. Fuente A2 (CB).

El gráfico, C-80 de claridad musical o grado de separación entre sonidos individuales, también presenta un intervalo de valores muy amplio -48,0 a 1,0 dB como podemos observar en la escala de la grafica de la figura 4.29, muy lejos del recomendado -4,0 a 0,0 dB debido a la ubicación de las zonas de audiencia en las naves laterales, pues la zona de audiencia de la nave central podría ajustarse a los límites recomendados.

C-80 [dB] 1 kHz

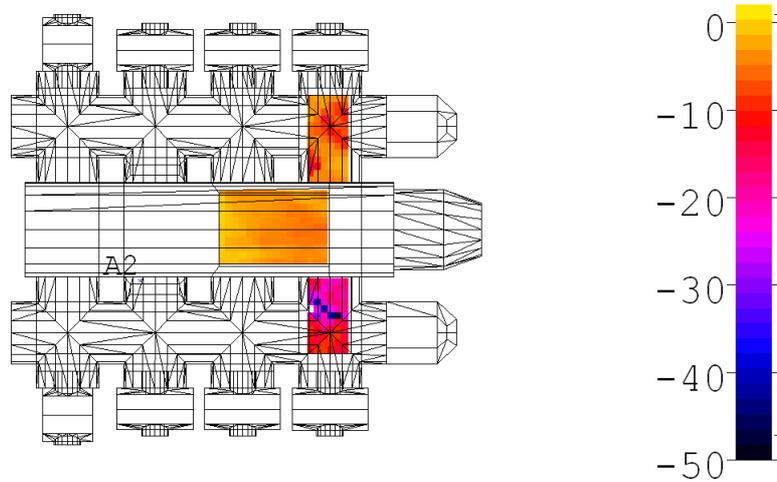


Figura 4.29.- Planta de claridad musical (C-80) para la frecuencia 1000 Hz. Fuente A2 (CB).

- El parámetro acústico que nos mide la espacialidad del sonido en un recinto, son las reflexiones laterales (**LF**), como ya hemos comentado, obteniendo unos valores muy pobres en la mayoría de la zona de audiencia con valores inferiores al 19 %, como se puede comprobar en la figura 4.30, lo que se transforma en una deslocalización de la fuente para la mayoría de los espectadores.

LF [%] 1 kHz

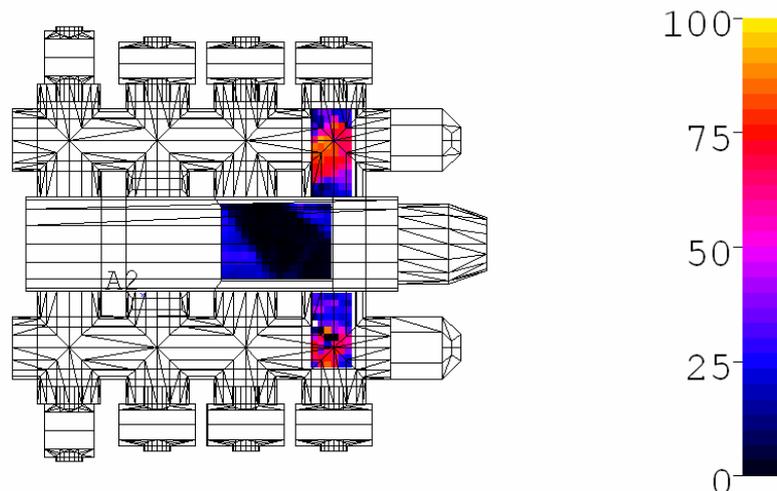


Figura 4.30.- Planta de la eficiencia lateral para la frecuencia 1000 Hz. Fuente A2 (CB).

No obstante este parámetro subjetivo presenta unas variaciones muy altas por frecuencias en cada receptor, como podemos ver en la tabla adjunta, 4.04 de

los receptores estudiados, incluyendo todas las frecuencias calculadas. El intervalo es: de 2,7 % a 40,9 %.

Frecuencia	125 Hz.	250 Hz.	500 Hz.	1 kHz.	2 kHz.	4 kHz.
REC. 01	3,1	8,8	3,7	10,2	6,9	5,2
REC. 05	31,0	32,3	33,0	28,0	32,4	39,9
REC. 10	4,6	13,7	15,6	2,5	40,9	35,1
REC. 12	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	18,7

Tabla 4.04.- Valores de LF (%) de cada receptor por frecuencias, con la geometría del supuesto Coro bajo. Fuente "A2".

.- El dato de inteligibilidad que vamos a comentar es el *RASTI*. El mapa de la planta de la figura 4.31, nos da una idea de la distribución y tendencia de la inteligibilidad de la palabra para este supuesto, en un rango muy amplio (24-54%) sin aportar valores exactos. Para conocer los datos exactos de cada receptor tenemos que estudiar el archivo "E_A2_12.TXT"¹⁷ o el "*RASTI_A2*" en el que nos aparece la grafica de la figura 4.32 junto con la ubicación y los valores de los receptores en un plano de planta, figura 4.33.

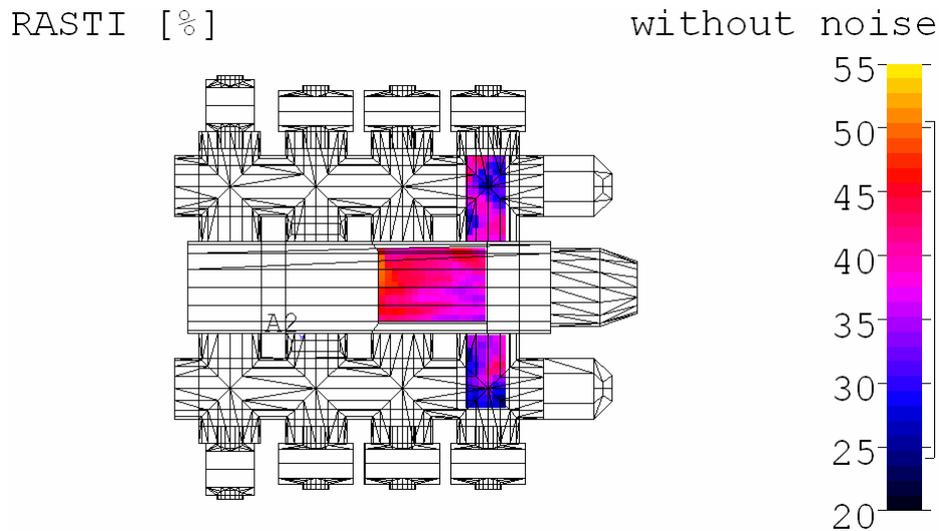


Figura 4.31.- *RASTI*. Fuente A2 (CB).

En esta grafica (figura 4.32) podemos observar los valores y la calificación de todos los receptores así como que el % máximo lo obtenemos en el receptor número 16 que llega a un valor del 61 %.

¹⁷.- En este caso es el del receptor número 12, pero existe un archivo para cada receptor con todos los datos calculados en cada supuesto.

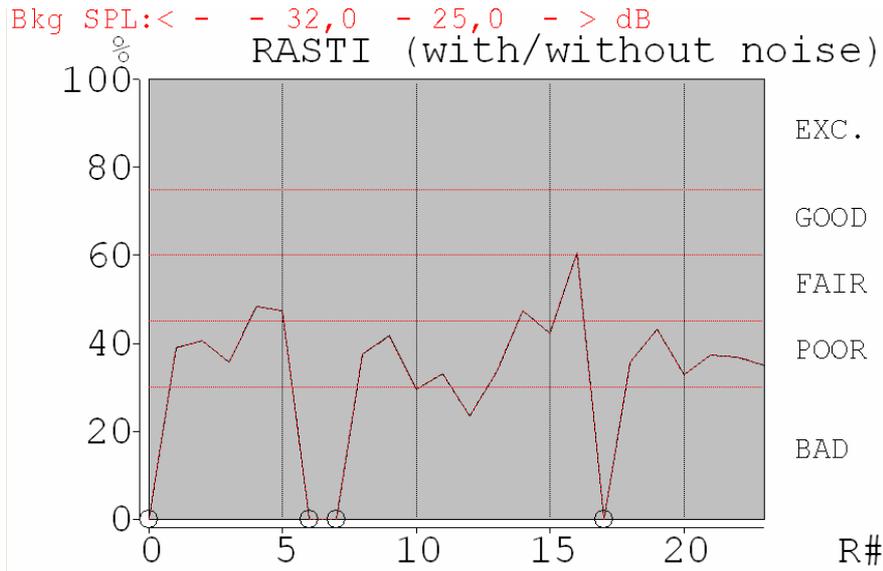


Figura 4.32.- Grafica de valores de *RASTI* por receptor. Fuente "A2" con el coro bajo.

Los valores del % de cada receptor que figuran en el plano de planta de la figura 4.33 son los que complementan los colores del plano de la figura 4.31.

[0->99] RASTI [%] (without noise)

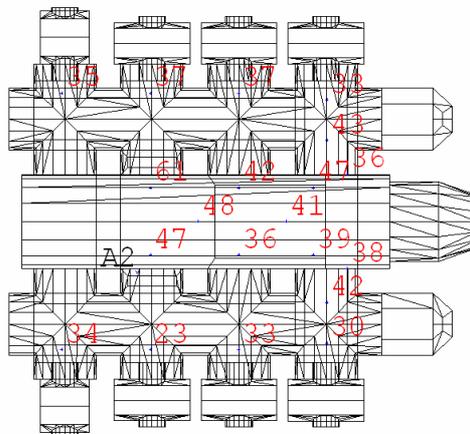


Figura 4.33.- Planta de valores de *RASTI* por receptor. Fuente "A2" en coro bajo.

Para terminar el análisis de los parámetros temporales más significativos de la sala adjuntamos una tabla 4.04, en la que podemos comparar los datos, por frecuencias, del T-30 (entendemos que es un valor representativo del recinto), de las dos geometrías, la del estado actual (E. A., volumen, 56.850 m³ y superficie de audiencia 580 m²) y la del coro bajo (C. B., volumen, 55.890 m³ y superficie de audiencia 327 m²), así como una grafica de los mismos valores en segundos, figura 4.34.

Como podemos comprobar en la tabla 4.05 los valores por frecuencias son muy similares, a pesar de la diferencia de volumen (unos 960 m3), entre las dos geometrías.

Frecuencias (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
E. A. (s)	3,99	3,98	3,79	3,27	3,07	2,07
C. B. (s)	3,90	4,11	3,84	3,56	3,11	2,22

Tabla 4.05.- Valores globales en segundos del T-30, en las dos geometrías.

En esta tabla comprobamos que la geometría con el coro bajo, tiene unos valores de tiempo de reverberación ligeramente superiores a los de la geometría del estado actual a pesar de tener un menor volumen, tiene mayores valores de T-30. Esta diferencia se explica por la reducción de la superficie de audiencia. Al reducir la absorción total compensa la disminución del volumen, con lo que los datos de los parámetros de las dos geometrías presentan muy pocas diferencias.

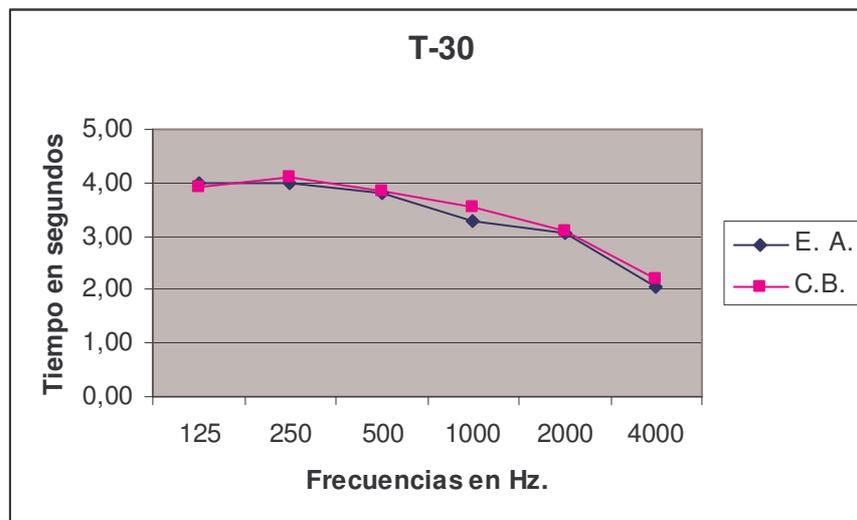


Figura 4.34.- Grafica de valores globales en segundos del T-30, en las dos geometrías.

4.4.- HISTOGRAMAS

El histograma de reflexión es otro de los gráficos que nos facilita el programa de simulación, para cada modelo, pudiendo observar en el la importancia relativa que tiene cada plano del recinto y el porcentaje de impactos de rayos sonoros que recibe. El archivo interactivo en 3D “REFLINFO” o “PLINFO” completa esta información, a la hora de ubicar en el modelo el plano buscado.

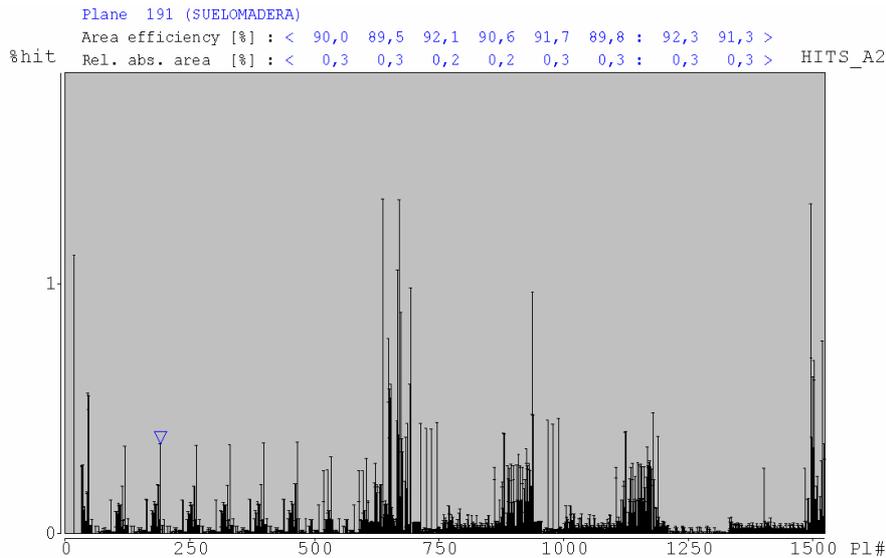


Figura 4.35.- Histograma de reflexiones de superficies. Fuente “A2” en coro bajo.

La importancia de este grafico interactivo radica en que podemos conocer los planos y las zonas que más influencia tienen sobre las reflexiones de la sala, dependiendo de la ubicación de las fuentes. Ante un tratamiento acústico del recinto, una posible restauración o las labores de mantenimiento habituales (pintura, limpieza, instalación calefacción, etc) entendemos que es aconsejable conocer el comportamiento de los distintos materiales y su peso en las reflexiones del recinto, sin tener que recurrir a la electroacústica para solucionar todos los problemas acústicos de la sala.

En la figuras 4.35 y 4.36 podemos ver los histogramas generados por el programa para la geometría del estado actual con las fuentes “A1” y “A0”, ubicadas en el coro alto y en el presbiterio respectivamente, destacando sobre el resto el plano 667 de la audiencia de la nave mayor, con un porcentaje del 2,5 % aproximadamente en ambos casos.

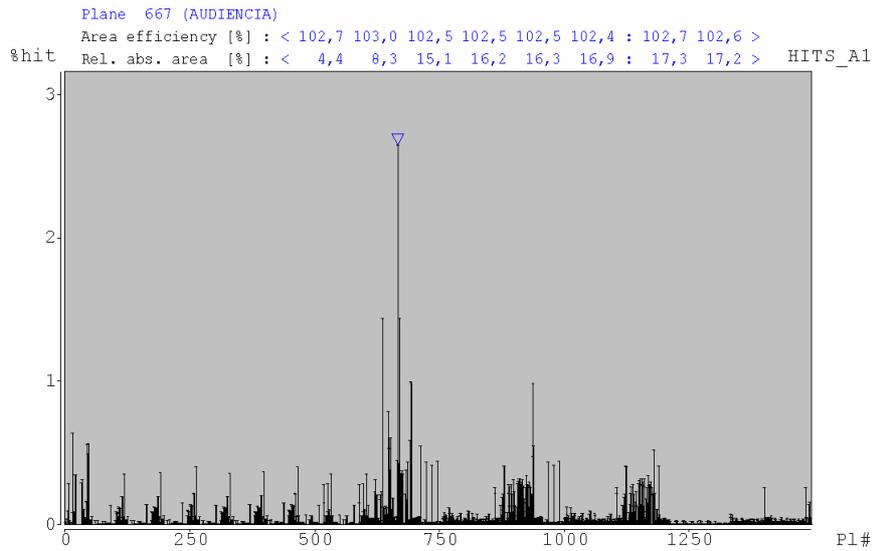


Figura 4.36.- Histograma de reflexiones de planos. Fuente "A1" estado actual.

Otro dato que nos confirman los gráficos de los histogramas es la importancia de geometría y la ubicación de las fuentes, en cada modelo, como podemos comprobar en las figuras 4.35 y 4.36, que tienen una distribución muy parecida (debido a que ambas se encuentran en el eje de simetría), con diferentes fuentes, a diferencia del generado por la segunda geometría, figura 4.34.

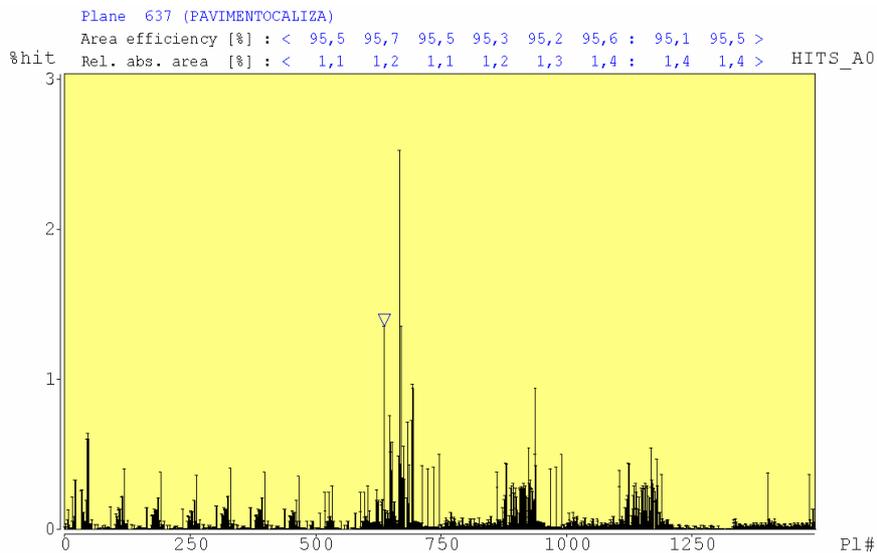


Figura 4.37.- Histograma de reflexiones de planos. Fuente "A0" estado actual.

5.- CONCLUSIONES

Como se ha comentado en el primer capítulo, el objetivo principal de este trabajo es la caracterización acústica de un Monumento Histórico Artístico como es, la inconclusa Catedral de Valladolid, contribuyendo a ampliar el conocimiento sobre el comportamiento acústico de los recintos de las Catedrales Castellano Leonesas. Para ello hemos construido dos modelos virtuales del recinto (uno el del estado actual y otro con el coro bajo desaparecido), que procesamos con el programa de simulación acústica “*CATT-Acoustic v8.0b*”. Algunos autores, ajustan los modelos virtuales con mediciones *in situ*, siguiendo la metodología de la norma UNE-EN-ISO 3382, extremo que no se ha considerado en este trabajo.

En la obtención de los parámetros acústicos particulares del recinto estudiado en esta simulación, no se ha tenido en cuenta la megafonía instalada, centrandó nuestra atención en los posibles eventos musicales (de los muchos acontecimientos acústicos que se pueden celebrar en la sala), sin olvidar los resultados de los parámetros que definen la inteligibilidad de la palabra para las tres posiciones consideradas de la fuente, que suponen una actuación polifónica desde el presbiterio (“A0”), un concierto del órgano actual romántico (“A1”) y un concierto del mismo órgano en su anterior ubicación (“A2”).

Para completar la caracterización acústica del inmueble se han visto los mapas de ruido del entorno de protección del monumento. Entendiendo que este apartado, independientemente de lo que pueda afectar al ruido de fondo, aporta una información interesante a los datos acústicos de la Seo de Valladolid. Faltando por comprobar la repercusión de las medidas del plan de acción municipal en la zona, anunciadas en 2008.

Los resultados obtenidos de la simulación pueden clasificarse como lógicos y esperados, nada raros, con las condiciones comentadas. En este capítulo exponemos las conclusiones que han resultado del análisis de estos datos comentados en el anterior, centrandó nuestra atención en la geometría del estado actual, puesto que la diferencia de los parámetros acústicos obtenidos en este trabajo es muy pequeña.

Estas son:

1. El nivel de presión sonora (SPL) recibido en la mayoría de las zonas de la audiencia es inferior al recomendado (60,0 dB). Esto se debe a las dimensiones de la sala. Destacando que este recinto se caracteriza por unos materiales muy reflectantes, poco absorbentes y un volumen muy elevado en relación con el número de plazas posibles, $V/pl. = 46,16 \text{ m}^3/\text{per}$. Siendo los valores aconsejados de entre 4 y 6 m^3/per , para la palabra y entre 6 y 9 m^3/per , para la música.
2. Como consecuencia de las dimensiones del recinto, la mayor parte de la audiencia tiene unos porcentajes de inteligibilidad de la palabra por debajo de los valores óptimos de RASTI y STI, (88-100%) comprendidos entre malos de 24-34%, pobres de 36-49% y aceptable de 50-64%, excepto en la zona próxima a la fuente.
3. Comparando los valores de los tiempos de reverberación (SabT) globales obtenidos en la simulación, que van de 2,07 a 3,64 segundos, con los aconsejados para recintos destinados específicamente a la música de órgano y canto coral (1,8 a 3,2 s), vemos que en la mayoría de los casos son muy superiores, en todos los supuestos, independientemente de la posición de la fuente considerada, con alguna excepción a altas frecuencias.
4. Dentro de los parámetros energéticos estudiados, sonoridad (G), claridad musical (C-80), definición (C-50), y a la vista de las representaciones en los planos coloreados de estos valores, podemos deducir que existe una zona próxima a la fuente donde los índices obtenidos son buenos, degradándose a medida que nos alejamos de esta. En el fondo de la audiencia es donde los valores son más pobres.
5. El parámetro de espacialidad analizado LF (Eficiencia Lateral), nos indica que la mayoría de las reflexiones no son laterales. Puesto que los valores obtenidos están muy por debajo de los recomendados (LF > 19%) con muy pocas excepciones.
6. Las deficiencias acústicas más destacables que se han detectado son, la existencia de zonas en las que se producen ecos, zonas con falta de visibilidad y ausencia de sonido directo, en alguno de los

receptores así como unos bajos niveles de energía sonora en gran parte de la audiencia.

7. La diferencia del nivel de presión sonora total (SPL) comparando los datos de las dos geometrías estudiadas de la sala (en los receptores analizados a la frecuencia central de 1000 Hz), es inferior a 0,50 dB. En el caso del tiempo de reverberación estudiado (T-30), únicamente a bajas frecuencias, este tiempo es mayor en la geometría del estado actual. Obteniendo la mayor diferencia a la frecuencia de 1000 Hz. 0,29 segundos.
8. La gran mayoría de los estudios publicados, que relacionan la acústica con los monumentos, son trabajos teóricos. La realidad es que en esta Comunidad Autónoma de Castilla y León la restauración institucional no considera a la acústica en sus proyectos, a pesar de que los redactores de los mismos suelen ser equipos multidisciplinares.

Como conclusión general se puede decir que el recinto de la actual catedral de Valladolid, dependiendo del acontecimiento, necesita recursos acústicos en casi toda la superficie de la audiencia. Entendemos que la necesaria restauración del interior del templo, debería de tener en cuenta los aspectos relacionados con el tema, lo cual, ayudará a mejorar la calidad acústica del recinto, tanto para una actuación musical como para la inteligibilidad de la palabra, así como a reducir los costes de mantenimiento. Como norma general, las medidas que se tomen para mejorar la calidad acústica de la sala, deberían suponer una disminución del volumen y un aumento de la absorción.

En la actualidad las deficiencias acústicas del recinto, se suplen con la electroacústica, tanto en los actos litúrgicos como en los conciertos del órgano electrónico ALLEN.

Por último, nos quedaría por plantear alguna de las posibles líneas de investigación acústica en el campo de la restauración de bienes inmuebles.

Un ejercicio que ampliaría este trabajo sería la redacción de un proyecto de restauración del interior del templo, en el que, por primera vez en esta Comunidad Autónoma de Castilla y León, se contemple el acondicionamiento acústico de una Catedral. En el que entendemos se debería incluir el estudio

de la influencia de las distintas patinas del interior, en la calidad acústica de la sala, así como los coeficientes de absorción y dispersión específicos de estos acabados tradicionales, de los siglos XIV al XVI, en los templos castellanos así como sus posibles mejoras acústicas. Puesto que estas patinas suponen del orden del 42 % de la superficie interior.



Figura 5.1. Perspectiva, proyecto de Juan de Herrera según Fernando Chueca Goitia.

Otro trabajo de investigación interesante sería terminar virtualmente, 486 años después, el templo que diseñó Juan de Herrera en 1580, iglesia que como Colegiata se comenzó a construir el 13 de junio de 1527. El modelo en 3D del interior de la catedral herreriana completamente terminada nos permitiría la realización de una visita virtual, así como poder escuchar actuaciones musicales, en distintos puntos de la sala, por medio de la auralización. Trabajo que es una continuidad del presente y en el que estamos empeñados.

6.- BIBLIOGRAFÍA.

- Alonso, A. Suárez, R. Sendra, J. Álvarez, L.** LA ACÚSTICA DEL CRUCERO DE LA CATEDRAL DE SEVILLA EN LAS GRANDES CELEBRACIONES. PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Ka. Evora. Portugal 2012
- Alonso, B.** Diego de Riaño y los maestros de la Colegiata de Valladolid. De Arte, 3. p.p. 39-53. 2004
- Álvarez, L. Alonso, A. Galindo, M. Zamarreño, T. Girón, S.** INITIAL ACOUSTIC MODEL TO SIMULATE THE SOUND FEILD OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE. PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka. ISVA. Valencia 2011
- Antolinez de Burgos, J.** Historia de Valladolid. Valladolid 1887
- Arau-Puchades, H.** REVISIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN: El método de cálculo, la precisión predictiva de la ley. PACS: 43.55 Br. Tecni-Acústica, León 2010
- AVANCE DE DIRECTRICES DE ORDENACIÓN TERRITORIAL DE VALLADOLID Y ENTORNO, UN INSTRUMENTO ABIERTO, APLICABLE Y ADAPTABLE. JUNTA DE CASTILLA Y LEON, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dirección General de Urbanismo y C. A. Instituto de Urbanística de la UVA 1998
- Aulestia, C.** Estudio del estado acústico de dos iglesias patrimoniales de Quito (La Catedral y la Compañía de Jesús) Universidad de las Americas. (Trabajo de titulación) Quito (Peru) 2010
- Barba, A. Giménez, A.** ANALISIS ACÚSTICO DE LA TIPOLOGÍA TEATRAL A LA ITALIANA A TRAVES DEL ESTUDIO DEL TEATRO PRINCIPAL DE VALENCIA. ISSN: 0210-3680. Revista de Acústica. Vol. 40 N°3-4, pp. 9-26. Madrid 2009
- Barrío, J. I.** Sistemas de predicción de parámetros que caracterizan el campo sonoro en iglesias. Tesis doctoral. Madrid 2008
- Berrardi, U. Cirillo, E. Marbellota, F.** LA EXTENSIÓN Y CLASIFICACIÓN DE UN MODELO ENERGETICO PARA PREDECIR PARÁMETROS ACÚSTICOS EN IGLESIAS. PACS: 43.55.Br. Coimbra, Portugal 2008
- Bueno, A. León, A. y Galindo, M.** SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LA IGLESIA DE SANTA ANA DE MONTARAZ. PACS: 43.55.Gx; 43.55.Ka; 43.58.Ta, Valencia 2011
- Calabria, J. Martín, C. Ramírez, L.** ANÁLISIS ACÚSTICO DE TRES IGLESIAS CON DISTINTA TIPOLOGIA EN MALAGA. PACS: 43.55+p. Málaga.
- Colina, C. Moreno, A.** Acústica de la edificación. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Fundación Escuela de la Edificación. Madrid 1997
- Carrión, A.** Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Universidad Politécnica de Cataluña, SL. Barcelona 1998

- Chueca, F.** La Catedral de Valladolid una página del siglo de oro de la arquitectura española. Instituto Juan de Herrera. Madrid 1998
- CATT –Acoustic V8. User´s Manual. Gothenburg. Sweden 2002
- CODIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. Edita: egn, comunicación 2006
- Daumal, F.** RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN ACÚSTICA EN LA ARQUITECTURA PATRIMONIAL (realidad o mito de los modelos). PACS: 43.55.Ka. ISVA. Valencia 2011
- Decreto 37/2007, de 19 de abril, por el que se aprueba el Reglamento Cultural de Castilla y León 2007
- Díaz, C. Pedrero, A.** LA ACÚSTICA DE LA IGLESIA DEL MONASTERIO DE SANTO DOMINGO DE SILOS Y SU ADECUACIÓN A LA PRACTICA DEL CANTO GREGORIANO. PACS: 43.55.Gx. Gandia 2006
- Ewar, A. Wetherill.** Acoustic of worship spaces. Publisher by the American Institute of Physics for the Acoustical Society of America. San Diego. 1983
- Fernández, J. Roldán F. P. Sánchez, J. I. San José, J. I.** LAS RUINAS DE DIOS. Arquitectura olvidada en la provincia de Valladolid. Valladolid 2004
- Frutos, A.** Estudio de la colocación de un difusor simétrico en el auditorio “Thonhalle ST. Gallen. Trabajo fin de Máster. Gandia (Valencia) 2012
- Gatón, E.** “1ª FASE. PLAN DIRECTOR DE LA IGLESIA CATEDRAL de Nuestra Señora de la Asunción. VALLADOLID” Promotor: JUNTA DE CASTILLA Y LEON, Consejería de Cultura. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural. Diciembre 1995
- “PROYECTO DE: RESTAURACIÓN ZONA DE LA COLEGIATA CATEDRAL DE VALLADOLID” Promotor: JUNTA DE CASTILLA Y LEON, Consejería de Cultura. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural. Septiembre 1996a
 - “2ª FASE. PLAN DIRECTOR DE LA IGLESIA CATEDRAL de Nuestra Señora de la Asunción. VALLADOLID” Promotor: JUNTA DE CASTILLA Y LEON, Consejería de Cultura. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural. Diciembre 1996b
 - “PROYECTO DE: RESTAURACIÓN ZONA DE CUBIERTAS DEL LADO DE LA EPISTOLA DE LA S.I. CATEDRAL DE VALLADOLID” Promotor: JUNTA DE CASTILLA Y LEON, Consejería de Cultura. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural. Diciembre 1997
 - “PROYECTO DE: ADECUACIÓN DEL ARCHIVO DIOCESANO DEL LADO DE LA EPISTOLA DE LA S.I. CATEDRAL DE NTRA. SRA. DE LA ASUNCION DE VALLADOLID” Promotor: JUNTA DE CASTILLA Y LEON, Consejería de Cultura. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural Julio 2000
- Gonzalez, G. Esteve, J. Daumal, F.** LA VOZ DE DOS MONASTERIOS A EXAMEN: SANTES CREUS Y SANTA MARIA DE POBLET. Evora. Portugal 2012

- Giménez, A. Cibrián, R. Segura, J. Cerdá, S. Barba, A. Montell, R. Lactáis, R. Romero, J. Miralles, J. L. Fernández, M. Navasquillo, J.** REVISIÓN DE LA ACÚSTICA DE SALAS: desde las medidas objetivas a la virtualización y evaluación subjetiva. PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka. Valencia 2011
- Iriarte, T.** Lecciones instructivas sobre la historia y la geografía. Imprenta de los hijos de Doña Catalina Piñuela. Madrid 1830
- Labajo, J.** LA DIMENSIÓN DEL ESPACIO ARQUITECTONICO: La Catedral de Valladolid. Homenaje al profesor Martín González, pp. 757-762. Universidad de Valladolid. Valladolid 1995
- Ley 12/2002, de 11 de julio, de Patrimonio Cultural de Castilla y León 2002
- López, F. Álvarez, L. Zamarreño, T. Galindo, M. Girón, S.** EL SONIDO VIRTUAL DEL PANTEON DE ROMA. PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Ka. Evora. Portugal 2012
- Marconi, P.** Dal piccolo al grande restauro colore. Structura, architettura. Saggi Marsilio. Segunda edición 1989
- Merino, J. M.** La reja de la catedral de Valladolid. VARÍA DE ARTE. p.p. 446-453
- Mingarro, M. López, M^a C. Fort, C. R.** "ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION EN LA CATEDRAL DE VALLADOLID" Consejería de Cultura. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural. Madrid 1997
- Montell, R.** Sistemas de realidad virtual para el estudio del campo acústico de edificios del patrimonio artístico-cultural. (Tesina de máster) Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 2010
- Montell, R. Giménez, A. Cerdá, S. Segura, J. Cibrián, R. Barba, A.** Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la Catedral Metropolitana de Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Evora-Portugal 2012
- Muñoz, S. Zamarreño, T. Sendra, J. Navarro, J.** REHABILITACIÓN DE UN ESPACIO ECLESIAL COMO ESPACIO ESCENICO. Comunicación TECNIACÚSTICA, PACS: 43.55.Fw, 43.55.Ka. Bilbao 2003
- Neufert, E.** Arte de proyectar en arquitectura. 13^a edición. Editorial G. Gili, S.A. Barcelona 1978
- Planells, A. Montell, R. Segura, J. Barba, A. Cerdá, S. Cibrián, R. Radu, L. Jiménez, A.** ELABORACIÓN DE MODELOS PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO EN ENTORNOS VIRTUALES. PACS: 43.10.Pr, 43.55.Ka. Valencia 2011
- Patrick, G. Pérez, M. Wilils, J.** Diccionario Oxford Pocket, Oxford Universiti Press. Español-Ingles. Ingles-Español. Segunda edición. Italy 2003

- Rabun Taylor.** Los constructores romanos. Un estudio sobre el proceso arquitectónico. Ed. Akal, S. A. Madrid 2006
- Recuero, M.** ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA. Soluciones practicas. Ed. Paraninfo. Madrid 1992
- Redondo, M. J.** La Catedral de Valladolid y su maqueta (1780-1795). Homenaje al profesor Martín González, pp. 227-234. Universidad de Valladolid. Valladolid 1995
- Redondo, M. J.** La primera piedra de la posterior catedral de Valladolid (Artículo)
- Rivera, J. Andrés, S. Nieto, J. R. Rodicio, C.** Catalogo monumental de Castilla y León. Bienes Inmuebles Declarados. Parte II, pp. 850-851. Salamanca 1995
- Romero, A. Navarro, E. Segura, J.** ESTUDIO Y REHABILITACIÓN ACÚSTICA DE LA IGLESIA San Agustín DE VINAROS. Castelló ISSN: 0210-3680. Revista de Acústica. Vol. 41 N° 1-2, pp. 28-43. Madrid 2010
- Romero, A. Navarro, E. Segura, J.** ANALISIS DE LA POLOCORARIDAD EN ESPACIOS SACROS. PACS: 43.55.Ka. Valencia 2011
- Ruiz, R. Díaz-Chyla, A. Pedrero, A. Díaz, C.** REVESTIMIENTOS FIJOS Y CONFIGURABLES EN LA ACÚSTICA DE LAS CATEDRALES. PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Ka. Evora- Portugal 2012
- Sambricio, C. Roldán, G. Villalobos D. y Rivera, J.** Estudios introductorios. "INFORME QUE HIZO EL ARQUITECTO DE S. M. D. VENTURA RODRIGUEZ EN EL AÑO 1768, DE LA SANTA IGLESIA DE VALLADOLID" Colegio Oficial de Arquitectos en Valladolid. Edición facsímil nº 652. Valladolid 1987
- Sáiz, J. L.** SANTA IGLESIA CATEDRAL METROPOLITANA DE VALLADOLID. Órgano de Aquilino Amezua / A. Amezua y Cía. (1904/1993). (Inédito) Valladolid 2011
- Sáiz, J. L. Campuzano, E. Carretero, A. Sánchez, J. Trueba, F.** EL ÓRGANO ROMÁNTICO EN VALLADOLID, LA CAPITAL ESPAÑOLA DEL MOTU PROPIO (1903/1936). Valladolid 2008
- Sanz, F. J. (STRATO.)** Informe del "SEGUIMIENTO Y EXCAVACIÓN ARQUEOLIGICA DE LA CATEDRAL DE VALLADOLID" Promotor: JUNTA DE CASTILLA Y LEON, Consejería de Cultura. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural. Valladolid. Febrero – marzo 1998
- Santa Cruz, J.** Metodología para la toma de datos: La definición geométrica. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2005
- Segura, J. Vera, L. Barba, A. Radha, M. Giménez, A. Fernandez, M. Cabrián, R. Cerdá, S. Romero, J.** ANALISIS DE AURALIZACIONES DEL NUEVO ÓRGANO DE LA BASILICA DE SAN JAUME DE ALGEMESÍ. Referencia PACS: 43.55.-n, 43.60.- c, 43.66.-x. Cádiz 2009
- Sendra, J. y Navarro, J.** La evolución de las condiciones acústicas en las Iglesias: del Paleocristiano al Tardo Barroco. Universidad de Sevilla. Sevilla 1997

- Sendra, J. Zamarreño, T. y Navarro, J.** La acústica de las Iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla. Universidad de Sevilla. Sevilla 1999
- Simposio Internacional. ACTAS. La Europa de las Catedrales. Conservación y gestión. Fundación del Patrimonio Histórico de Castilla y León. Valladolid 2008
- Suárez, R. Sendra, J. Navarro, J. y León, A.** ESPACIOS ACOPLADOS EN LA MEZQUITA –CATEDRAL DE CORDOBA: el sonido de los límites. Informes de la construcción. Vol. 58,501, pag. 23-31. ISSN: 0020-0883. 2006
- UNE-EN-ISO, 3382-1. ACUSTICA “Medición de parámetros acústicos en recintos” Parte 1: Tiempo de reverberación. 2009
- UNE-EN-ISO, 3382-2. ACUSTICA “Medición de parámetros acústicos en recintos” Parte 2: Tiempo de reverberación. 2008
- Violet-le-Duc, E.** La construcción medieval. Instituto Juan de Herrera. Madrid 1996
- Vitruvio, M.** Los diez libros de Arquitectura. Traducción José Luis Oliver Domingo. Sexta reimpresión en “Alianza Forma”. Madrid 2009
- Zamarreño, T. Galindo, M. Girón, S.** SIMULACIÓN ACÚSTICA Y VIRTUALIZACIÓN EN RECINTOS DE CULTO. Universidad de Sevilla. Sevilla 2011
- Zamarreño, T. Algaba, J.** PARAMETROS ACUSTICOS MEDIDOS EN LA CATEDRAL DE SEVILLA. Comunicación TECNIACÚSTICA, Pamplona 1992

7.- ANEXOS Y DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

ANEXO 1

A.1.- DEFINICIONES

MONUMENTO: La Ley 12/2002, de 11 de julio de Patrimonio Cultural de Castilla y León en el artículo 8 del Capítulo primero, Título I, define los BIC. como:

“1. Los bienes muebles e inmuebles⁰. y actividades integrantes del Patrimonio Cultural de Castilla y León que reúnan de forma singular y relevante las características del artículo 1.2 de esta Ley serán declarados Bienes de Interés Cultural.”

“A efectos de la presente Ley, tiene la consideración de:

a) Monumento: la construcción u obra producto de actividad humana, de relevante interés histórico, arquitectónico, arqueológico, artístico, etnológico, científico o técnico, con inclusión de los muebles, instalaciones o accesorios que expresamente se señalen como parte integrante de él, y que por sí solos constituyan una unidad singular”.

ESPECTRO de FRECUENCIAS: Entendemos por tal, la representación gráfica de las frecuencias, junto con su correspondiente nivel de presión sonora. Una banda de una octava es un intervalo de frecuencias cuya relación en Hertz es el doble que la anterior.

RUIDO DE FONDO: se considera ruido de fondo, al ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad. Este ruido normalmente proviene del exterior o de las instalaciones del recinto. La evaluación del grado de molestia que un determinado ruido de fondo provoca sobre la audiencia se hace por comparación de los niveles de ruido existentes en la sala, para cada banda de octava, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC. En este caso consideramos que como máximo valdría con la curva 30, aceptando la del programa que es la NC-25.

SPL: Por definición, el nivel de presión sonora es 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora y el valor eficaz de la presión de umbral de audición, a 1 KHz. En decibelios dB.

REVERBERACIÓN: Es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido consistente en la permanencia del sonido, en la sala, una vez que la fuente ha dejado de emitir, debido a las ondas reflejadas. Auditivamente se caracteriza por una prolongación, a modo de cola sonora, que se añade al sonido original.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN: se define tiempo de reverberación a una frecuencia determinada como el tiempo, en segundos, que transcurre desde que la fuente deja de emitir hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60dB con respecto a su valor inicial.

Otras formulas del tiempo de reverberación:

En el primer capítulo hemos visto las formulas de Sabine y la de Eyring, pero existen muchas más publicadas, algunas de las cuales exponemos a continuación:

.- Formula de G. Millington,
$$T_R = \frac{0,162V}{\sum S_i \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\alpha_i}\right)}$$

.- Formula de Arau – Puchades, H. Esta teoría cumple con las prescripciones de Lothar Cremer ¹, pues calcula el T y el EDT. La teoría se basa en el diferente procedimiento de promediar los coeficientes de absorción entre paredes opuestas entre si y entre las paredes mutuamente perpendiculares.

$$T = \frac{0,16V}{S \cdot \alpha_{ArP} + 4mV}$$

donde:

$$\alpha_{ArP} = [a_x]^{S_x/S} \times [a_y]^{S_y/S} \times [a_z]^{S_z/S}$$

siendo el Early Decay Time. EDT, o tiempo de reverberación inmediato el que se indica: $EDT = D \cdot d = 60 \cdot d/T$, d es el factor de la distribución logarítmico normal, dado por:

$$d = \text{antilog} \left[\frac{1}{6} + B \left\{ \left(\frac{S_x}{S} \right) (\log a_x)^2 + \left(\frac{S_y}{S} \right) (\log a_y)^2 + \left(\frac{S_z}{S} \right) (\log a_z)^2 \right\} \right]$$

- Formula de L. Cremer, método variante de Millington para soslayar el problema de absorción 1, o superior, el TR valga 0.

$$T_R = \frac{0,162V}{S \overline{\alpha_{Cre}} \cdot \ln(1 - \overline{\alpha})}$$

$$\overline{\alpha_{Cre}} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{S_i} \sum_j \alpha_{ij} S_{ij} \right) \right]$$

- Formula de R. O. Neubauer. Esta teoría se basa en una corrección que H. Kuttruff realizó sobre la fórmula de Eyring.

$$T_{60} = \left(\frac{0,32V}{S^2} \right) \left(\frac{h(I+W)}{\alpha_{WW}^*} + \frac{IW}{\alpha_{CF}^*} \right)$$

donde:

V = volumen del recinto en m^3 . S = superficie total del recinto en m^2 .
 h, I, W = dimensiones de la sala en m .

α_{WW}^* ; $\overline{\alpha_{CF}^*}$ = Coeficiente de absorción medio global de paredes, techo, suelo. (Arau-Puchades, H. 2010)

Existen más teorías que aportan múltiples matices al cálculo del tiempo de reverberación; W. J. Fanklin (1903), A. Jaeger (1929), A. D. Fokker (1924), K. Shuster and E. Waetzman (1929), W. H. Sette (1933), Gomperts (1965), H. Kutturuf (1983), M. Tohyama y A. Suzuki (1986) (Arau-Puchades, H. 2010).

STI (*Speech Transmisión Index*): este índice lo definió Houtgast y Steeneken, y permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. El rango para cuantificar este va de 0 (inteligibilidad nula) a 1 (inteligibilidad óptima). En este índice se asocia la inteligibilidad de la palabra a la reducción de los diferentes índices de modulación de la voz, debida a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala. Su cálculo es laborioso puesto que hay que considerar el efecto de las 14 frecuencias de modulación (F_m) sobre las siete bandas de octava más representativas (F_0) trabajando con 98 valores ó índices de modulación obtenidos con la siguiente formula:

$$m(F_0, F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_m f(F_0)}{13,8} \right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{s}{N}(F_0)}}$$

(Carrión, 1998)

RASTI (*Rapid Speech Transmisión Index*), o índice de inteligibilidad de la palabra es una simplificación del **STI**, utilizando para su calculo solamente las dos frecuencias centrales de las bandas de octava 500 Hz y 2 KHz.

DEFINICIÓN, D-50: Thiele lo define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms, desde la llegada del sonido directo (incluye sonido directo y primeras reflexiones) y la energía recibida total.

CLARIDAD MUSICAL, C-80: indica el grado de separación entre los sonidos individuales que integran una composición musical. Se define como el cociente entre la energía sonora recibida durante los primeros 80 ms, después de recibir el sonido directo y la energía que llega después de los primeros 80 ms, calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4KHz.

El C-80 se expresa en escala logarítmica (dB). La elección del intervalo temporal de 80 ms, se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo, contribuyendo a aumentar la claridad musical. (Carrión, A. 1998)

EFICIENCIA LATERAL, LF (*Lateral energy Fraction*): Marsall define la eficiencia lateral como la relación entre la energía que llega lateralmente a un oyente dentro de los primeros 80 ms, desde la llegada del sonido directo y (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo.

SONORIDAD, G: Lehmann, define este valor como la diferencia entre el nivel total de presión sonora L_p , producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m.

La sonoridad es un parámetro indicativo del grado de amplificación producido por la sala sobre el mensaje oral emitido. Esta disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente.

EDT (*Early Decay Time*): o decaimiento de los 10 primeros ms, se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB. Este parámetro está muy relacionado con el TR y varía en función de la frecuencia. Este parámetro nos da la reverberación percibida, que consideramos subjetiva, mientras que el TR nos da la reverberación real, objetiva. Se utiliza para determinar el grado de viveza de una sala.

El objetivo para garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, correspondiente a las bandas de 500 Hz y 1KHz, es que sea del mismo orden que el RT.

TIEMPO CENTRAL (t_s): Kúler, lo definió como el momento de primer orden del área situada por debajo de la curva de decaimiento energético. Dicho parámetro es indicativo de la “distancia” (en ms) desde el origen temporal $t=0$ hasta el “centro de gravedad” del área de la curva de decaimiento:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{en ms})$$

REFLEXIÓN EXPECULAR: Entendemos por reflexión marcadamente especular cuando se cumplen las siguientes condiciones: 1ª Grandes dimensiones en comparación con la longitud de onda del sonido. 2ª La superficie es lisa y muy reflectante.

REFLEXIÓN DIFUSA: Cuando tenemos una superficie con irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, la reflexión de la onda incidente se produce en múltiples direcciones, produciéndose una difusión del sonido.

DIFRACCIÓN: este fenómeno se produce cuando las dimensiones del objeto u obstáculo que recibe la onda acústica son menores o similares a la longitud de la onda sonora que impacta y esta le rodea por efecto de la difracción.

ABSORCIÓN ACÚSTICA: Este fenómeno es el responsable de la disminución de la energía sonora y hay dos formas de entender este proceso;

1º Formalista, cuando la energía acústica se disipa en forma de calor al atravesar un medio. Esta variación de energía dependerá de la intensidad de la onda, de la distancia recorrida y de las características del medio.

2º En sentido amplio, toda aquella energía acústica que no se refleja.

L_{den} , o nivel equivalente día, tarde, noche. Lo podemos calcular con la siguiente formula:

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \right]$$

ECOGRAMA, es la representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones a un receptor, acompañadas de su nivel energético correspondiente. El ecograma se divide en tres partes; sonido directo, zona de primeras reflexiones y cola reverberante, o reflexiones tardías, pasados los primeros 100 ms, dependiendo del volumen de la sala. (Carrión, A. 1998)

JND. (*just noticeable difference*) ó MDP, **mínima diferencia perceptible**. Se denomina JND a la más pequeña variación que el oído humano puede discriminar entre dos estímulos diferentes.

ANEXO 2

A.2.- SESIÓN DE CATT

CATT-Acoustic, es la herramienta con la que vamos a calcular los parámetros acústicos de la catedral, que son objeto de análisis en este trabajo. Esta es la razón por la que entendemos que debemos de hacer un repaso de una sesión de trabajo que nos sirva de referencia.

El proceso que vamos a seguir para estudiar y comprender las partes más importantes de este programa de simulación acústica, es comentar todos los pasos de una sesión, desde que abrimos el programa.

Una vez abierto el programa, lo primero que debemos hacer es fijar unas preferencias previas, antes de cargar los archivos de la geometría, las fuetes y los receptores, con los parámetros que nos van a condicionar el resultado del trabajo. En la barra de herramientas vamos a la pestaña **File** y dentro de esta: **preferencias** donde nos aparece la siguiente ventana:

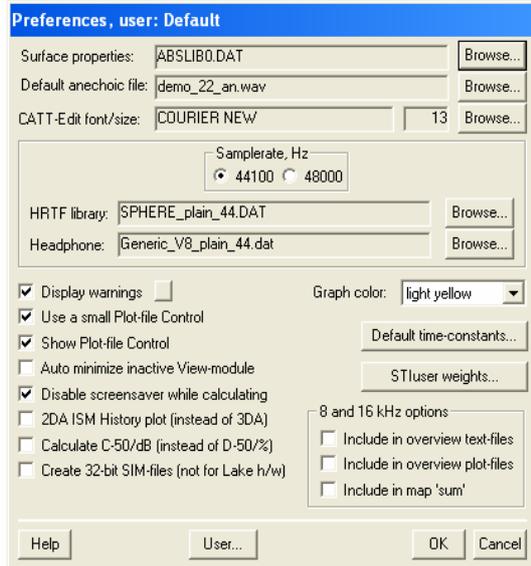


Figura 7.1.- Preferentes, user: default.

En la que podemos escoger la librería en **Surfaces properties** o introducir nuestras propias librerías. Muy importante puesto que todo el comportamiento de la sala depende de los coeficientes de absorción y los coeficientes de reflexión de los materiales empleados. Estos coeficientes se pueden modificar posteriormente, para ajustar los resultados de la simulación y en caso de

realizar medición *in situ*, lo que algunos autores llaman, calibrar el modelo (Álvarez, L. et al 2011).

La siguiente pestaña **Default anechoic file** no la vamos a configurar puesto que se usa para la convolución.

En **CATT-Edit font/size**, definimos la fuente el tamaño y el estilo de letra que queremos en nuestro proyecto.

Calculate C-50/dB (instead of D-50/%): permite decidir en que parámetro o unidad queremos que nos presente los resultados del índice de definición.

Defaul time-constants, definimos o afinamos el peso de las frecuencias en el ecograma.

STluser weights: nos abre otra ventana con tres opciones: **Original**, con los pesos normales para STI según el programa. (Qué es la que utilizamos inicialmente en este trabajo) **STI modified** con los pesos fijados con la teoría de *Floyd and Steinberg* y la tercera opción **User**, donde se da la posibilidad de modificar manualmente los pesos asignados a cada banda de octava. En cualquiera de las tres opciones la suma de los pesos de las bandas será 1. Comentar que en esta tabla aumenta a 7 bandas, cuando en la mayoría los cálculos se trabajar con 6 bandas.

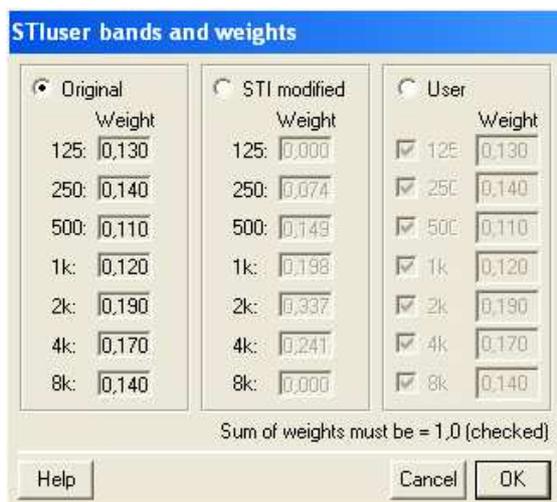


Figura 7.2.- STluser bands and weights.

Display warning: En este apartado elegimos o definimos el tipo de mensajes de error que queremos que aparezcan al realizar la simulación. Para los poco iniciados (como es el caso) es aconsejable pedir todos los mensajes, de forma

que el programa nos cuente lo que tenemos que modificar. También nos ayuda con los errores de la geometría del modelo, como duplicidad de vértices o *corner*, duplicidad de planos etc, ya comentados, desconociendo los procesos de selección y si se trabaja en una corrección automática, como propone Radha Impar Montell Serrano, en su Tesina de Máster.

8 and 16 kHz options: el programa no calcula estas bandas, pero en esta opción podemos ampliar los resultados del rango de frecuencias (lo que hace es una interpolación), en las tablas, en las gráficas y en los mapas.

.- Una vez fijadas las preferencias pasamos a la siguiente ventana o modulo de **Prediction**. Ventana que se abre automáticamente desde el principio:

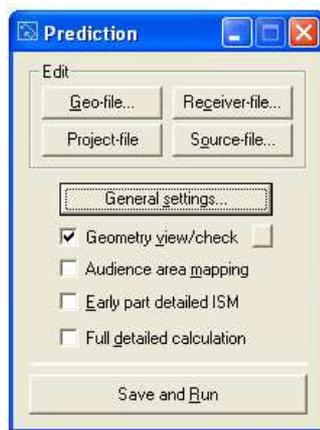


Figura. 7.3.- Pantalla de Prediction

Esta ventana nos permite crear un proyecto, **General settings** y da la opción de navegar por los distintos tipos de software del programa, **Audience area mapping** (mapa de la zona de audiencia) **Early part detailed ISM** (modelo detallado de los parámetros de la fuente) y **Full detailed calculation** (cálculo detallado completo). Es a la que tenemos que recurrir para acceder a la geometría del modelo virtual para realizar las modificaciones y poder comprobar rápidamente si son efectivas.

General settings: nos abre otra pantalla de dialogo en la que debemos empezar fijando el nombre de referencia al proyecto de simulación en **Proyec. Input folder**, el segundo paso dentro de esta pantalla, es indicar en que archivo tenemos la geometría del modelo para que pueda usarla, también tenemos que generar una carpeta donde vamos a guardar los resultados de la simulación, **Output folder**. Una vez cargada la carpeta de la geometría y las propiedades del modelo, podemos visualizarlas y modificarla (corrección de

errores) con **edit**, al igual que en **Sound sources**, archivo de las fuentes y en **Receivers**, archivo de receptores, en ambos podemos decidir cuales van a estar activos en cada sesión de simulación.

Diffuse reflection: nos da la opción de elegir el tipo de difusión de la simulación: ninguna, solo las superficies y teniendo en cuenta los ejes de difusión (**surface+edge**, generalmente para reflectores). Si tenemos planos o superficies que no tienen definida la difusión el programa le puede asignar una por defecto, mediante **Surface default**.

Acoustic environment: definimos las propiedades del aire, se aconseja tomar los valores medios del recinto. **Temperatura**: temperatura del aire. **Humidity**: humedad relativa del aire. **Density**: densidad del aire.

Air absorption: podemos decidir si se tiene en cuenta la absorción del aire, si se estima o si introducimos los valores de la absorción, dependiendo del recinto y de la precisión que queramos obtener.

Background noise: en este apartado se introducen los valores del ruido de fondo.

Geometri view/check: decidimos la representación geométrica, en esta pantalla

Antes de empezar con los cálculos, tenemos que hacer una corrección de errores de la geometría de la sala, para que las fugas de rayos se ajusten a un porcentaje razonable, errores que el programa nos irá anunciando uno a uno, si lo tenemos correctamente indicado en **debug**.

- Audience area mapping. (Mapa de la zona de audiencia) En esta pantalla decidimos algunos de los valores propios de la simulación y el programa genera los mapas acústicos de los parámetros seleccionados. La predicción esta basada en el algoritmo **RTC-II** (*Randomized Tail-corrected Cone-tracing*, segunda versión), en *ray-tracing*, o en el modelo ISM (*Image source Model*), permite hasta 260 fuentes sonoras, 100 receptores, difusión dependiente de la frecuencia, difusión de borde y un rango de frecuencias de 125 Hz a 4000 Hz bandas de octava.

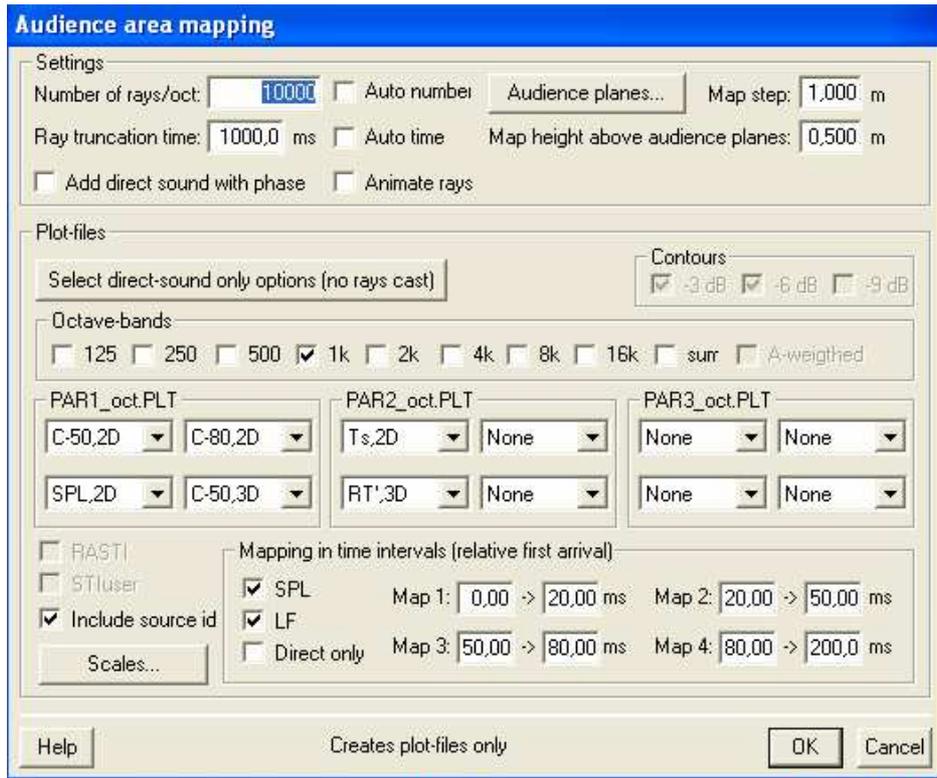


Figura. 7.4. - Pantalla de *Audience area mapping*.

Esta dividida en dos grandes zonas, **Setting** y **Plot-files**.

En la zona de **Setting**: fijamos el número de rayos a emplear en la simulación, el tiempo de truncamiento o duración, la amplitud de los valores de salida de la simulación, si queremos ver la animación del trazado de rayos, la altura del mapa por encima de la audiencia y la escala del mapa. Debiendo definir previamente los planos de la audiencia para que pueda correr.

En **Plot-files**: fijaremos los parámetros que queremos obtener de la simulación, así como en qué bandas de octava queremos que se realice los cálculos. Aconsejan pedir solamente los parámetros necesarios puesto que condiciona sensiblemente el tiempo de cálculo de la simulación.

Los parámetros que podemos representar son: el nivel de presión sonora (SLP), la definición (D), la claridad (C80), la sonoridad (G), el tiempo de reverberación (RT), el tiempo central (Ts) etc. para todos se puede elegir la escala y la representación en 2D ó 3D ó ambas dentro de las 12 opciones disponibles.

.- La siguiente pantalla en la que tenemos que entrar a fijar las características de la fuente es la: **Early part detailed image source model** (Modelo detallado de los parámetros de la fuente). ISM, Este modulo se basa en el método de las imágenes con el que estudiamos las primeras reflexiones. La figura 3.7 nos muestra la pantalla de dialogo en la que podemos fijar los parámetros para los ecogramas y las reflexiones del emisor o como se viene designado habitualmente en este programa la fuente.

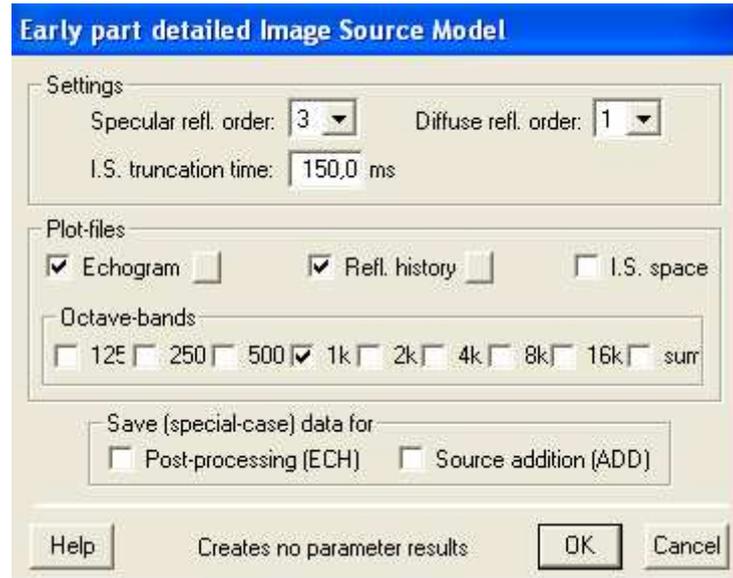


Figura.7.5. - Pantalla de *Early part detailed ISM*.

Está dividida en tres apartados, **Setting**, **Plot-files** y **Save (special-case) data for**.

En **Setting**: tenemos la opción de decidir el número de u orden de reflexiones que queremos para la simulación (con opciones de 0 a 9), el tiempo de truncamiento o duración de los rayos y el orden de difusión (0-1).

Plot-files: nos da la opción de decidir si sacamos el ecograma, con que escala y de que frecuencias de octava, el historial de las reflexiones entre otras.

Save (special-case) data for: Nos da la opción de guardar los datos para el postprocesado y así poder sumar fuentes.

.- **Full detailed calculation** (cálculo detallado completo): es el último modulo del programa y el más potente, en el que tenemos que decidir qué datos queremos obtener de la simulación y definir algunos parámetros para que se

pueda realizar esta. La teoría de este módulo esta basada en el trazado aleatorio de conos sonoros con corrección de cola. La primera pantalla de dialogo que nos ofrece CATT es la de la siguiente figura 3.8, que esta dividida en 5 sub-apartados.

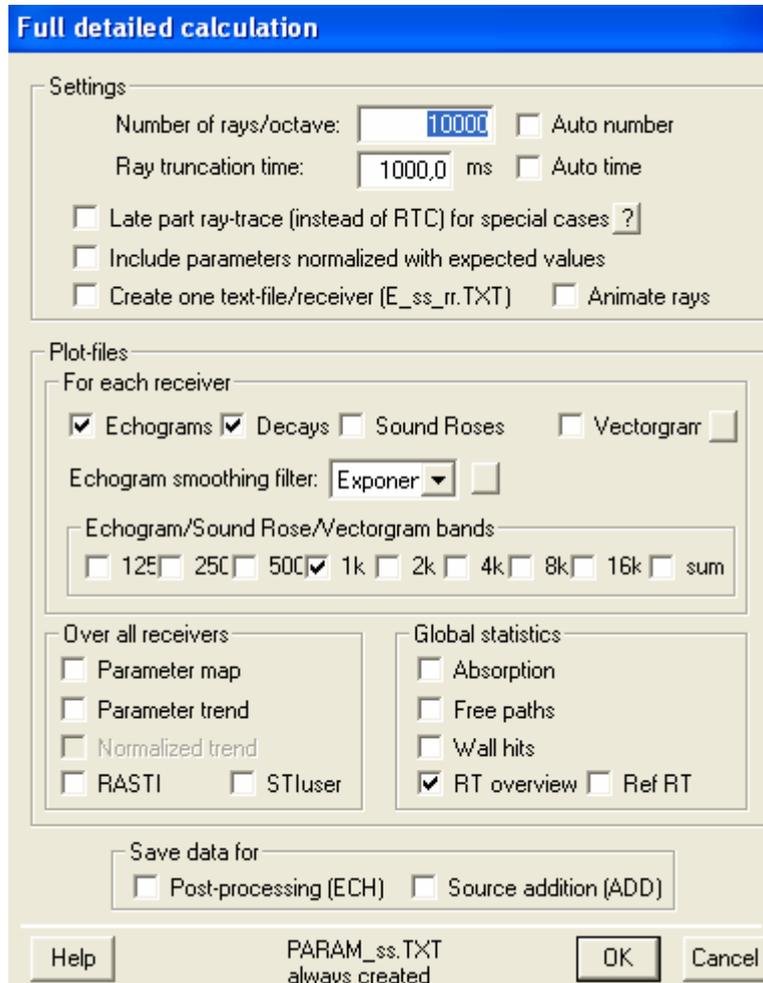


Figura. 7.6. - Pantalla de *Full detailed calculation*.

Settings: los parámetros que debemos fijar en este apartado son; el número de rayos, el tiempo de truncamiento, el algoritmo para calcular el TR y si queremos visualizar el proceso de lanzamiento de rayos. Estos datos de partida no tiene que ser el mismo que en apartados anteriores, puesto que los algoritmos de cada proceso son distintos, (¿e independientes?), no obstante se entiende que el cálculo tiene que tener una mínima coherencia.

Number of rays/octave: debemos de fijar el número de rayos con los que deseamos realizar el proceso, teniendo la opción de que los fije el programa, pero no sabemos el criterio que utiliza y al parecer no da buenos resultados.

Ray truncation time: fijamos el tiempo de truncamiento o duración de los rayos. Como en la opción anterior también tenemos la opción de que lo fijé el programa y aunque desconocemos los criterios que utiliza el resultado es mejor.

Late part ray-trace (instead of RTC) for special cases: nos da la opción de cambiar el algoritmo para el cálculo del tiempo de reverberación, se usa con superficies semitransparentes, o cuando el recinto no es cerrado.

Create one text-file/receivers [E_ss_rr.TXT]: nos da la opción de que la simulación cree un documento de texto donde aparezcan las propiedades de cada uno de los receptores. Opción que en esta ocasión nos va a ayudar mucho a estudiar los resultados.

Animate rays: esta opción permite visualizar el proceso de lanzamiento de rayos, y comprobar si barremos todo el recinto objeto de simulación y sí el tiempo de truncamiento es el correcto, es aconsejable cuando se esta empezando con un modelo nuevo, pudiendo modificar los datos de partida en cualquier momento.

El segundo gran apartado de proceso es **PLOT FILES:** en el que podemos escoger la forma de los resultados de la simulación, puesto que nos da varias posibilidades. La primera es para cada receptor, para todos los receptores y datos globales estadísticos.

For each receiver (para cada receptor): **Echograms;** podemos obtener la representación de los ecogramas para cada receptor y decidir en que banda de octava queremos que lo represente, así como el tipo de filtro y el peso de las frecuencias en cada una de las tres opciones, exponencial, triangular ó rectangular.

Decays: con esta opción activada en la pantalla, podemos ver el decaimiento del tiempo de reverberación por cada receptor y por cada banda.

Sound rose: nos permite visualizar la llegada de los rayos al receptor, desde las distintas perspectivas, así como decidir en que tiempos se representan los rayos.

Vectogram: figura 3.9, con los datos que fijemos en esta pantalla obtenemos una representación de cómo salen los rayos de la fuente, el tiempo que queremos que represente, cada cuanto tiempo queremos que cambie de color y el nivel de presión inicial (dB).



Figura 7.7. - Pantalla de *Vectogram settings*.

Over all receivers (para todos los receptores). Empezamos por **Paper map**: esta opción representamos en planta los datos que decidamos (Ts, C-80, LFC, T30, T15, EDG, G y D-50) dándonos el valor de cada receptor.

RASTI: en el fichero de texto generado por el programa aparece el valor del RASTI en cada receptor, el programa lo facilita en %, clasificándolo en BAD (0-30), POOR (30-45), FAIR (45-60), GOOD (60-75) y EXC (75-100).

STI: como el caso anterior en el fichero de texto generado por la simulación aparece el valor en cada receptor.

GLOBAL STATISTICS (datos globales estadísticos).

Absorción: nos representa la absorción de los materiales de los planos en cada banda de octava.

Wall hits: representa para cada banda de octava y para cada material la eficiencia del área y la absorción relativa de la misma.

RT overview: marcando esta opción el programa nos representa para cada banda de octava el tiempo de reverberación obtenido por cada uno de los métodos con los que lo calcula el programa. Teniendo la opción de ver el tiempo de reverberación de referencia y la absorción que nos faltaría para obtener el valor de referencia. Esta opción es muy interesante a la hora de proponer nuevos materiales, pues sabemos la absorción que tienen que tener (CATT. Manual).

ANEXO 3

A.3.- DOCUMENTACIÓN GRAFICA

Reportaje fotográfico

Ficha Catastral

Solicitud de Licencia de obras para; cúpula sobre la torre (1922)

Declaración de Monumento Histórico Artístico (1931)

Resolución de incoación del entorno (2005)

Recortes de prensa.

PLANOS: A.03.1.- Entorno de protección
 A.03.2.- Mapas de ruido
 A.03.3.- Planta baja, estado actual
 A.03.4.- Planta baja con coro desaparecido
 A.03.5.- Sección transversal
 A.03.6.- Perspectiva, volúmenes

REPORTAJE FOTOGRAFICO



Fig. 7.3.1. Catedral de Valladolid.



Fig. 7.3.2. Fachada principal, sin restaurar (1999)



Fig. 7.3.3. Fachada principal restaurada

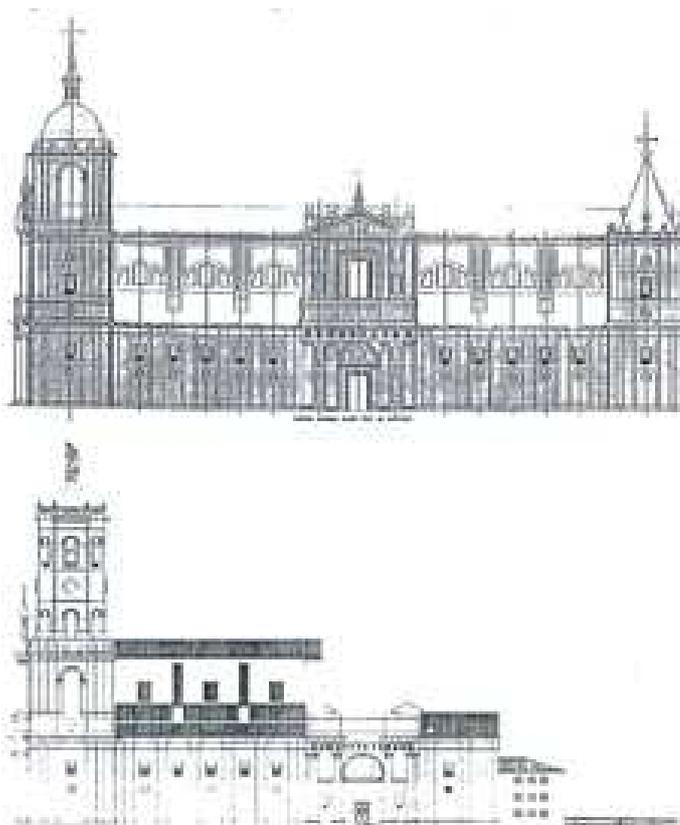


Fig. 7.3.4. Alzados a Plaza de la Universidad, Proyecto de Herrera. Estado actual.



Fig. 7.3.5. Alzado a calle Cardenal Cos. Estado actual.

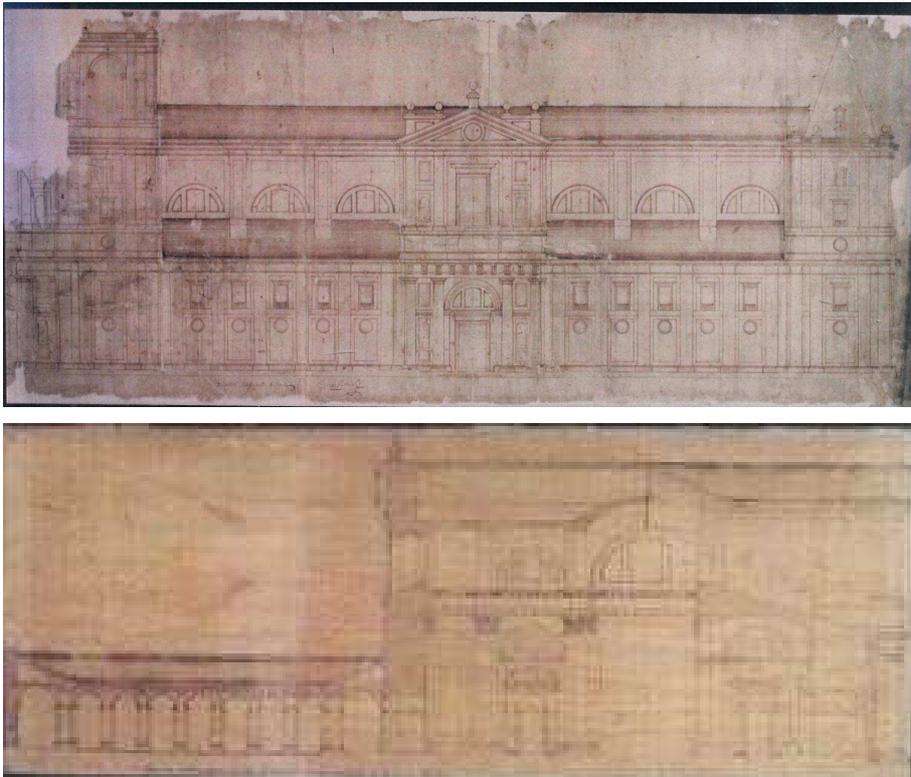


Fig. 7.3.6. Planos originales del proyecto de Juan de Herrera de 1580 (Archivo Diocesano).

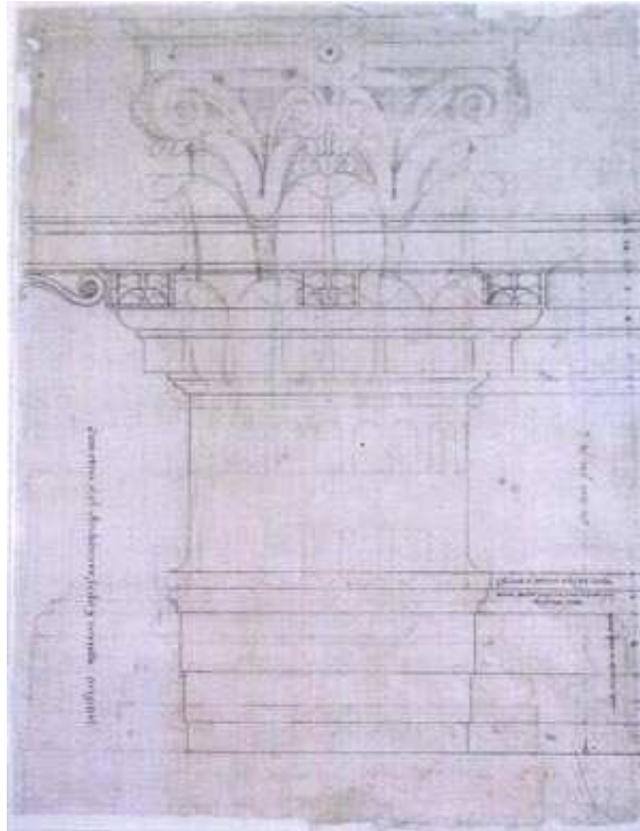


Fig. 7.3.7. Detalle del proyecto de Juan de Herrera de 1580 (Archivo Diocesano).



Fig. 7.3.8. Fachada a Plaza de la Universidad. Estado actual.



Fig. 7.3.9 Vista exterior, detalle del estado actual de los cerramientos, a Plaza de la Universidad.



Fig. 7.3.10. Vista exterior, contrafuertes y coronación de muro norte, a Plaza de Portugalete.

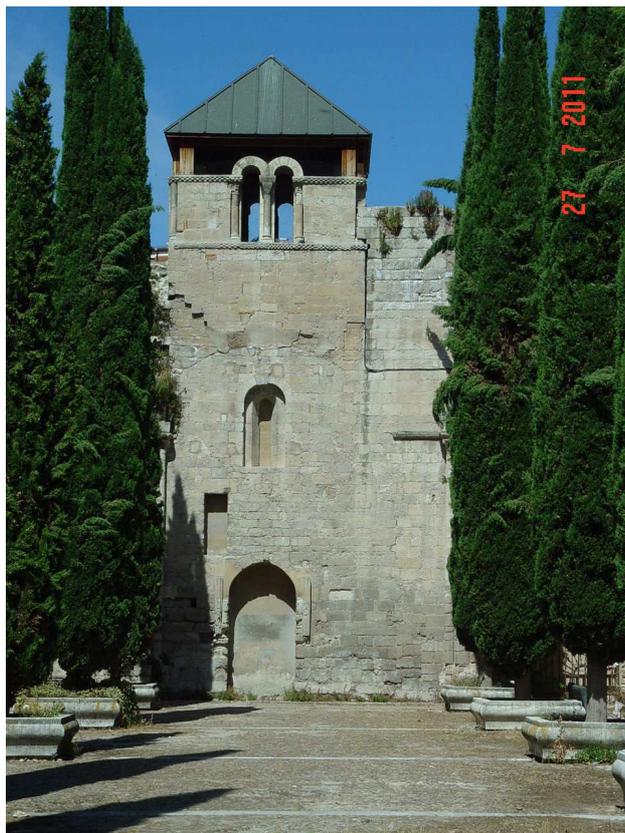


Fig. 7.3.11. Torre pórtico románica, restaurada.



Fig. 7.3.12. Restos de la segunda Colegiata.



Fig. 7.3.13. Restos de la segunda Colegiata.



Fig. 7.3.14. Vista exterior del cerramiento, provisional, del crucero.



Fig. 7.3.15. Vista exterior de la fachada norte a Plaza Portugalete.



Fig. 7.3.16. Vista exterior de cerramiento provisional a Plaza Portugalete.



Fig. 7.3.17. Vista exterior de la fachada a la Plaza Portugalete.



Fig. 7.3.18. Vista exterior de cerramiento de la nave mayor.



Fig. 7.3.19. Restos de Torre del Evangelio desaparecida.



Fig. 7.3.20. Puerta principal de la Catedral de Valladolid.



Fig. 7.3.21. Acceso al archivo Diocesano (Puerta de torre sur).



Fig. 7.3.22. Detalle exterior de *óculus* de Capillas Hornacinas.

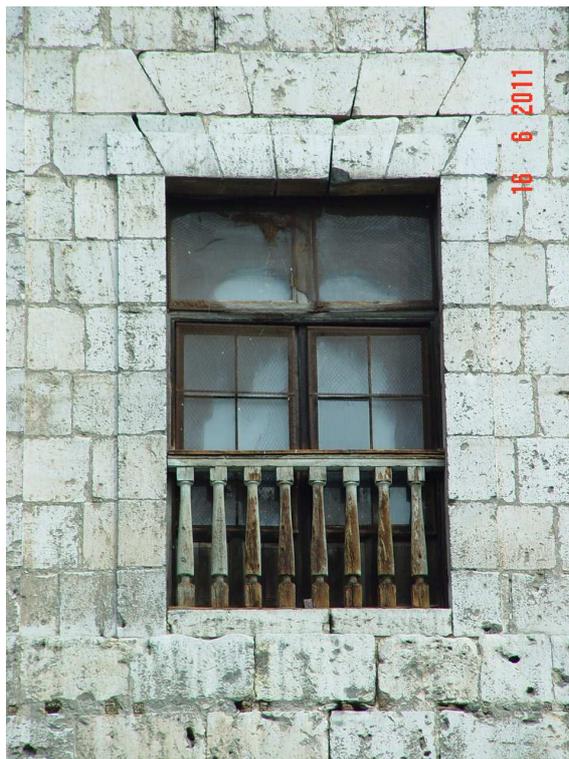


Fig. 7.3.23. Detalle de balcón, con carpintería de madera a Plaza de la Universidad.

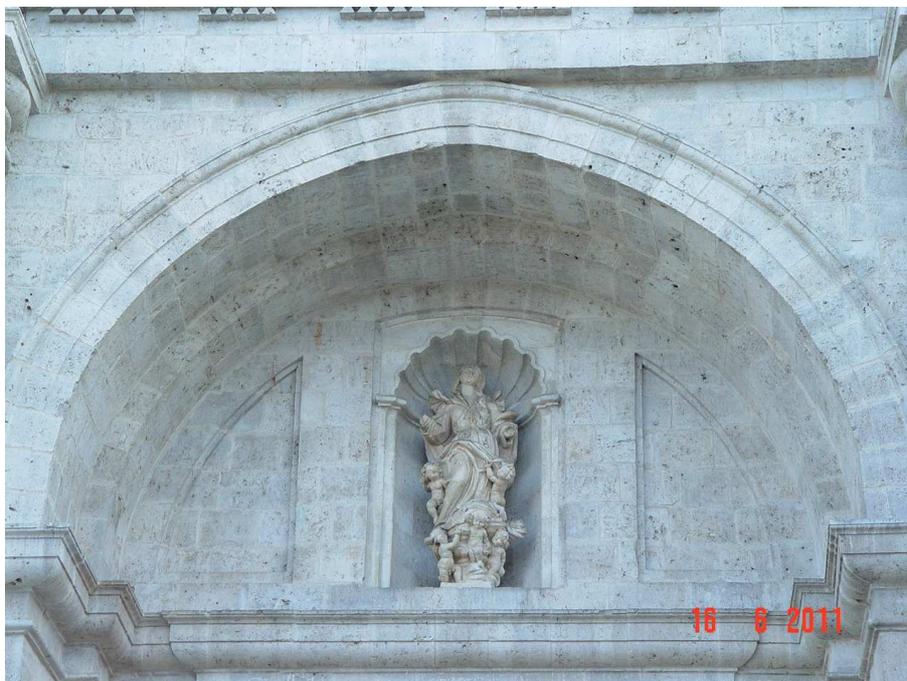


Fig. 7.3.24. Detalle de hornacina en fachada principal.

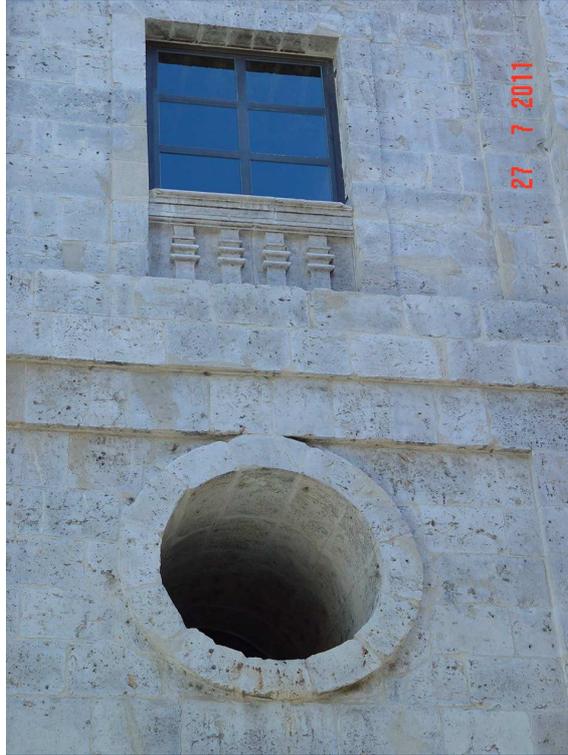


Fig. 7.3.25. Detalle de *óculus* y bacón, en cerramiento exterior a Plaza de Portugalete.



Fig. 7.3.26. Escultura del Sagrado Corazón, rematando la cúpula de la torre, de Ramón Núñez.



Fig. 7.3.27. Cuarto de instalaciones de la catedral.

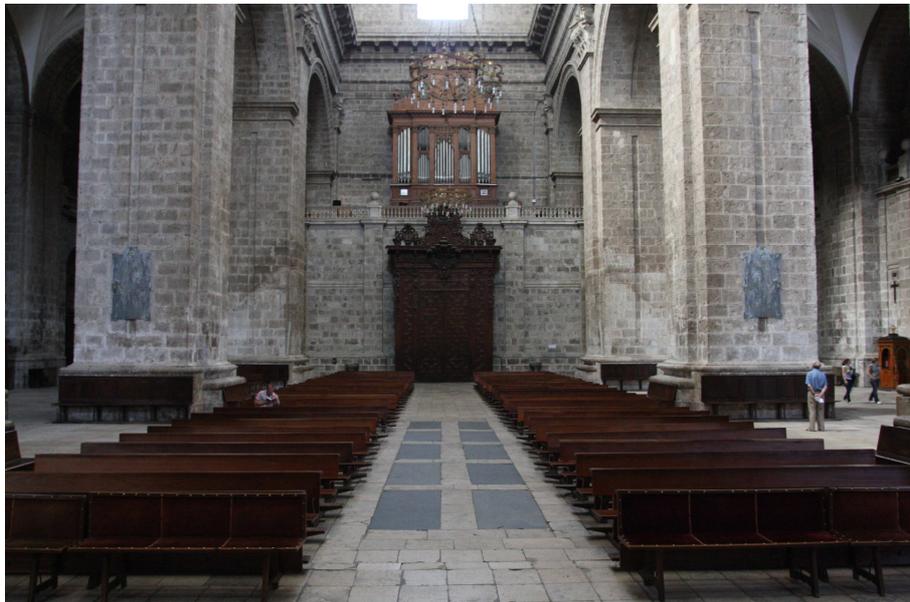


Fig. 7.3.28. Vista de la zona de la audiencia de la nave mayor, hacia la puerta principal.

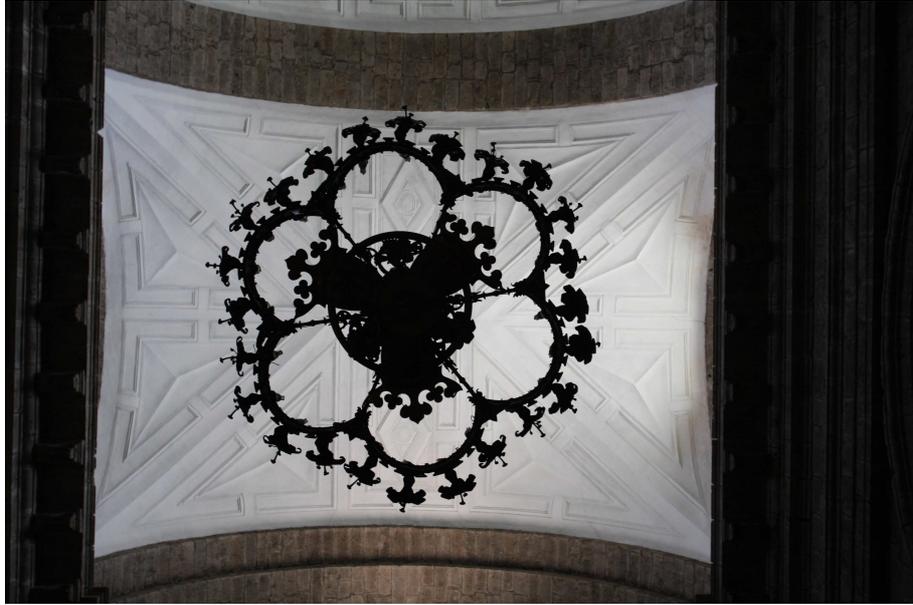


Fig. 7.3.29. Vista bóveda de cañón con lunetos y lámpara, nave mayor.



Fig. 7.3.30. Vista interior de capitel corintio en nave mayor.



Fig. 7.3.31. Bóveda de crucería, nave menor.



Fig. 7.3.32. Vista interior de la catedral.

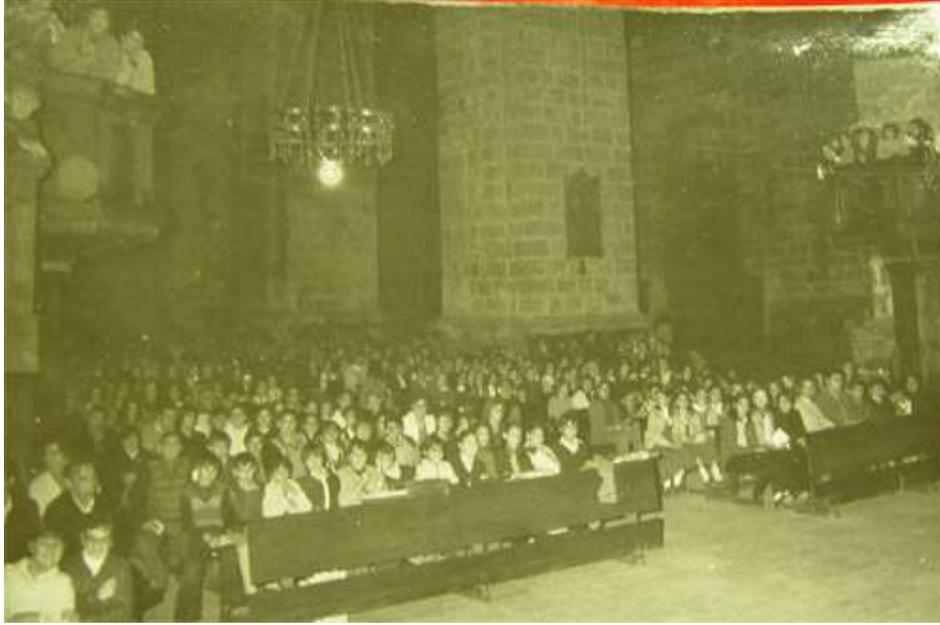


Fig. 7.3.33. Interior, postal (Archivo provincial).

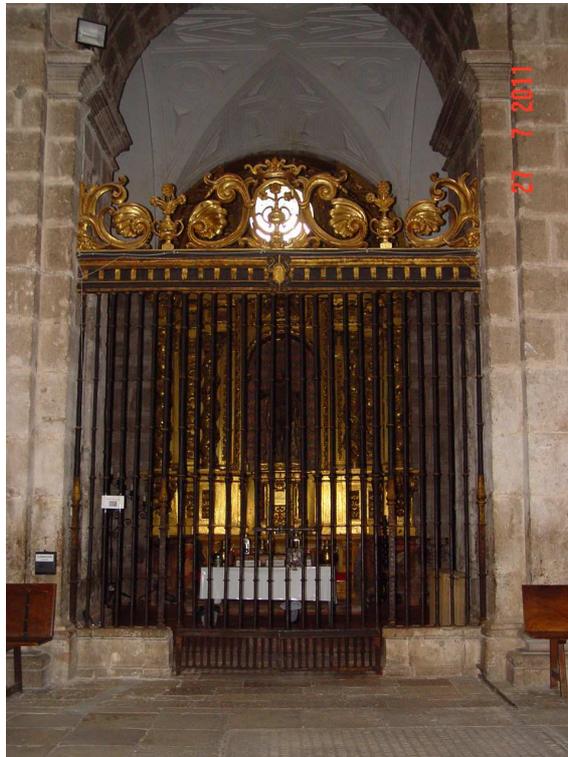


Fig. 7.3.34. Reja de Capilla Hornacina.



Fig. 7.3.35. Detalle del pavimento de piedra caliza, nave del evangelio.



Fig. 7.3.36. Nave mayor.



Fig. 7.3.37. Detalle de suelo de tarima en Capilla Hornacina.



Fig. 7.3.38. Detalle de instalación de megafonía.



Fig. 7.3.39. Detalle de encuentro de sillería de caliza con enfoscado de mortero cemento.

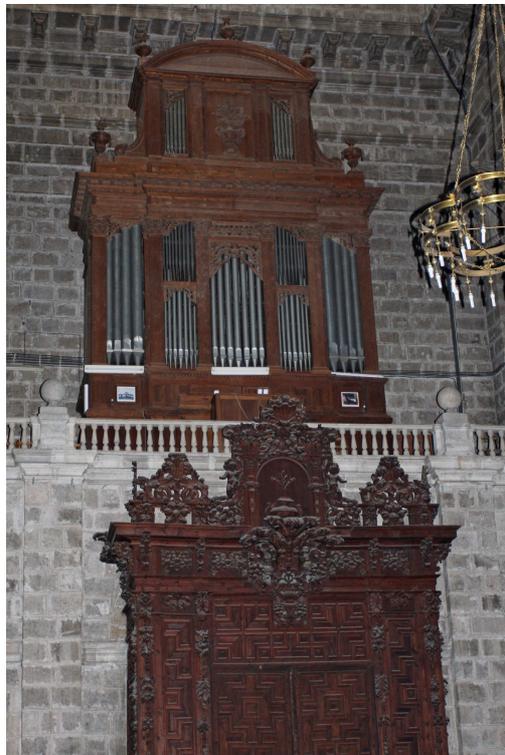


Fig. 7.3.40 Órgano romántico.



Fig. 7.3.41 Presbiterio, con siales del coro bajo.

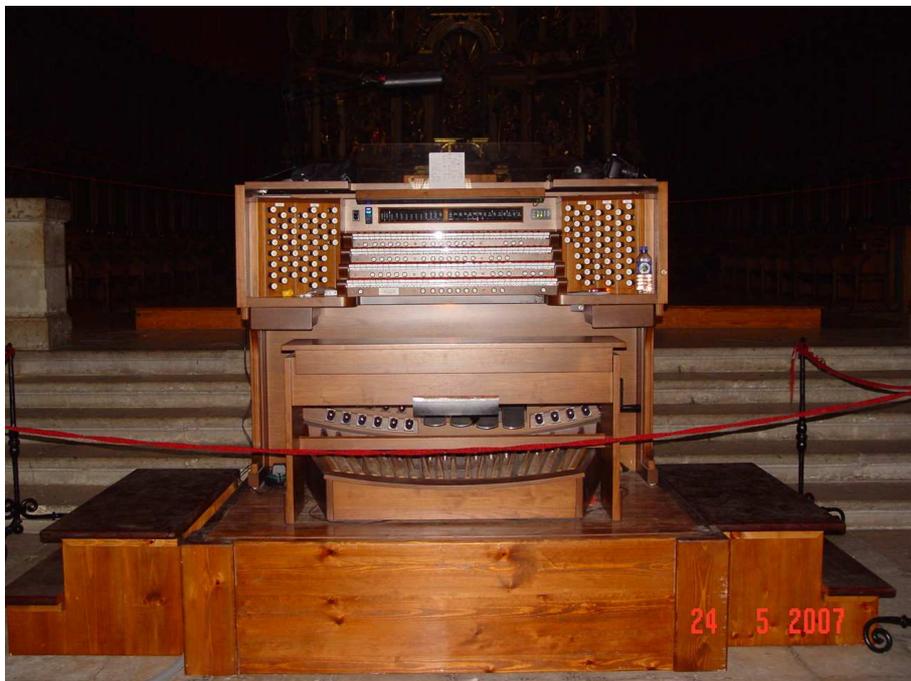


Fig. 7.3.42 Órgano ALLEN.

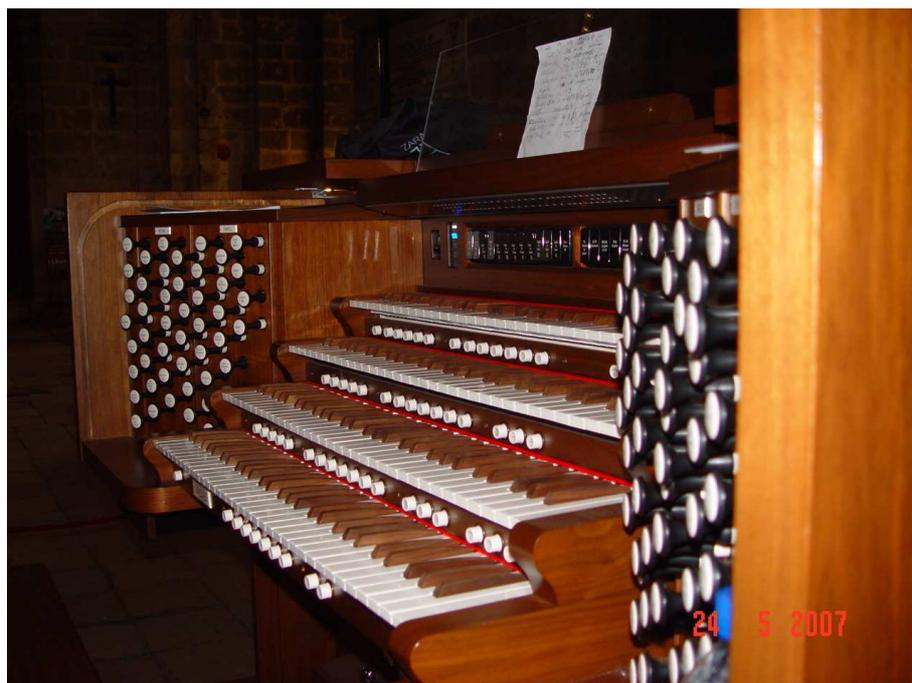


Fig. 7.3.43 Detalle de Consola de órgano ALLEN.



Fig. 7.3.44 Ubicación actual de un sitial del coro bajo en la capilla mayor.

FICHA CATASTRAL

