

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA

MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



“ESTUDIO DE MODELOS PREDICTIVOS DEL
TIEMPO DE REVERBERACIÓN Y
PARÁMETROS DE CALIDAD”

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autor:

Jose Joaquín Pérez Maciá

Tutores:

Jesús Alba Fernández

Romina María del Rey Tormos

Gandía, 2020

Abstract/Resumen

The present work deals with the study of predictive models of reverberation time and other acoustic quality parameters in rooms considered to be acoustically special. The main parameter of the work is the reverberation time, which is compared with the methods provided by Sabine, Eyring, Fitzroy and Arau, and with a new method provided by the author. After taking measurements in 3 different spaces, taking into account the difference in both the objective of the room and its size, and comparing with the results of the classic methods, we reach the point of trying to introduce or discard another new calculation method. This method is based on two totally empirical premises: taking into account the solid angle formed by the source with the different surfaces and differentiating between first reflection and subsequent surfaces. The results obtained show as a conclusion that the classical methods designed for diffuse field are, in general, more in line with the results of diffuse field enclosures, and those of non-diffuse field, with non-diffuse field enclosures. The empirical method introduced by the author provides variable results depending on the space, although it is better for diffuse field.

El presente trabajo trata sobre el estudio de modelos predictivos del tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos de calidad en recintos considerados acústicamente especiales. El parámetro principal del trabajo es el tiempo de reverberación, el cual se compara con los métodos proporcionados por Sabine, Eyring, Fitzroy y Arau, y con un nuevo método proporcionado por el autor. Tras realizar mediciones en 3 espacios diferentes teniendo en cuenta la diferencia tanto de objetivo del recinto como de tamaño y, comparando con los resultados de los métodos clásicos, se llega al punto de intentar introducir o descartar otro nuevo método de cálculo. Dicho método se basa en dos premisas totalmente empíricas: tener en cuenta el ángulo sólido que forman la fuente con las diferentes superficies y diferenciar entre superficies de primera reflexión y posteriores. Los resultados obtenidos muestran como conclusión que efectivamente los métodos clásicos pensados para campo difuso se ajustan, en general, más a los resultados de los recintos de campo difuso, y los de campo no difuso, a los recintos con campo no difuso. El método empírico introducido por el autor proporciona resultados variables dependiendo del espacio, aunque es mejor para campo difuso.

Keywords/Palabras clave

English: Reverberation time, sound quality, musical, speech, acoustics rooms.

Español: Tiempo de reverberación, calidad sonora, música, palabra, recintos acústicos.

Agradecimientos

Este no ha sido un trabajo fácil ni corto, y es por ello que quiero dedicárselo a diferentes personas. En primer lugar a mis tutores Jesús y Romina por haber querido guiarme en la realización de éste trabajo y haberme ayudado en todas las cuestiones que he ido teniendo. También a Juan Carlos Rodríguez Vercher por facilitarme tanto material en la distancia cómo trabajo a la hora de realizar todas las medidas que se han realizado en éste trabajo. A Elena Miguélez Monroy por su constante apoyo y haberme dado ánimos cuando veía que no tenía ganas de seguir, sin ella esto no habría sido posible. A la promoción 2019-2020 del Máster en Ingeniería Acústica de la EPSG, pues he tenido por fin la suerte de poder disfrutar muy buenos ratos hablando de música, sonido y acústica en los descansos de las clases, lo cual es algo que a veces echo de menos poder seguir haciendo y, además, con gente verdaderamente increíble. Finalmente a mi familia y amigos más cercanos, que se distribuyen entre Elche, Alicante, Tenerife, Gran Canaria, Lanzarote, Valencia y Heidelberg, son el pilar que hace que avance en mi vida y, junto con mi pareja, la clave de que esté contruyendo mi camino, gracias de corazón.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Introducción teórica acústica	1
1.2.1. El tiempo de reverberación, T_R	2
1.2.2. Coeficientes de absorción y reflexión	5
1.2.3. Parámetros de calidad acústica de salas	6
1.3. Teoría sobre la propagación ondulatoria	9
1.3.1. Modos propios	11
2. Metodología	13
2.1. Sobre las medidas	13
2.1.1. Nivel 1: Estudio de radio en Gandía	14
2.1.2. Nivel 2: Sala de conferencias en Alcoy	15
2.1.3. Nivel 3: Auditorio en Beniarbeig	17
2.2. Sobre los cálculos	19
2.3. Sobre el estudio teórico y la formulación empírica	19
3. Análisis experimental	21
3.1. Nivel 1: Estudio de Radio en Gandía	21
3.2. Nivel 2: Sala de conferencias en Alcoy	29
3.3. Nivel 3: Auditorio en Beniarbeig	36
3.4. Estudio teórico-empírico	43
3.5. Resultados	44
4. Conclusiones	51
Bibliografía	52

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son:

1. Revisar y estudiar los modelos teóricos que existen a día de hoy para la predicción del tiempo de reverberación, con el fin de optimizarlos para ciertos casos.
2. Comparar los diferentes modelos existentes entre sí y determinar cuál es el más recomendado en cada situación.
3. Elegir las soluciones más óptimas a las propuestas en la introducción teórica para el cálculo del tiempo de reverberación.
4. Probar la nueva teoría de este trabajo.
5. Extraer las conclusiones oportunas de la comparación entre los 2 métodos (clásicos y la nueva teoría) y los datos medidos y, comprobar si la nueva fórmula optimiza los resultados frente a métodos más clásicos para los tres espacios particulares de este trabajo.

1.2. Introducción teórica acústica

La acústica es una de las ramas de la física que menos profundización o impacto en el mundo de la ciencia ha tenido y, más en concreto, la parte de esta referida al sonido en espacios cerrados, es decir, la acústica de salas. Uno de los parámetros más importantes que posee esta subcategoría es el denominado coeficiente de absorción, α , y es básico para entender el comportamiento del sonido en un espacio cerrado. Como es de esperar, este guarda una estrecha relación que se verá más adelante con el tiempo de reverberación, T_R ó T_{60} , el cual abarca gran parte del tema de este trabajo. El coeficiente de absorción se define como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente por una superficie dada, aunque también se puede calcular con los mismos conceptos referidos a intensidad o potencia. Por tanto, dado que el T_R se puede definir brevemente como el tiempo que tarda el nivel de presión sonora (SPL) en descender 60 decibelios (dB) una vez cesa la fuente de sonido, se observa la conocida relación entre estos dos parámetros, dado que en ambos casos se habla a fin de cuentas de energía en el recinto. Por lo tanto, α será uno de los parámetros más influyentes en la cantidad de energía (densidad de energía) que se encuentre en cada punto del espacio que llena la sala, junto con otros parámetros que se verán en el punto 1.2.3.

La forma de repartirse esta densidad de energía generando un campo sonoro en la sala, hace que se diferencie entre campo sonoro difuso y campo sonoro no difuso. El campo sonoro es el campo físico

escalar que representa la distribución del nivel de presión sonora en cada punto del espacio tridimensional. Se hace referencia a él como escalar pues el nivel presión sonora es una magnitud escalar, cuya unidad de medida son los decibelios. El campo sonoro difuso es aquel en el que la densidad de energía en cada punto del espacio es constante, es decir, la energía se reparte por igual en todo el espacio tridimensional, mientras que el campo sonoro no difuso es aquel en el que la densidad de energía no es constante en todos los puntos del espacio. Dependiendo del tipo de recinto se verá como es más lógico tener en cuenta un tipo de campo u otro, pues dependiendo del tamaño entre otros factores, la energía sonora se podrá considerar que se reparte más homogénea o inhomogéneamente. Esto se verá más detalladamente en el punto 1.3.

Hoy en día son múltiples los métodos existentes utilizados para el cálculo de los parámetros y variables a tener en cuenta a la hora de querer mejorar la acústica de un recinto, es decir, los parámetros de calidad. Dentro de estos parámetros que definirán la calidad y características de la sala a construir o a estudiar, se tiene como parámetro temporal fundamental el ya mencionado tiempo de reverberación, junto con otros que se explicarán a lo largo de éste capítulo como la definición de la sala, las claridades musical y de la voz, el tiempo de decaimiento temprano, etc. De los diferentes métodos utilizados para el cálculo del parámetro T_R [1], se expone a continuación un resumen de los más relevantes en orden cronológico, entendiéndose por más relevantes aquellos que en la literatura siempre salen en la experimentación tanto real como computacional como más óptimos para el cálculo del T_R . Concretamente, se terminará indicando los más relevantes para éste trabajo, pues se verá que no todos son válidos para ambas situaciones de campo sonoro o para las diferentes geometrías estudiadas aquí.

Todos los parámetros acústicos tienen referencias de valores buscados o aceptados. En la medida de lo posible, y según si el autor los tiene o no en cuenta, se escribirán en la descripción de cada parámetro los valores buscados y según que autor, siendo los más relevantes en este trabajo Leo L. Beranek, Antoni Carrión, Higini Arau-Puchades y L. G. Marshall.

1.2.1. El tiempo de reverberación, T_R

El tiempo de reverberación, T_R , se define como el tiempo que tarda la energía sonora de una sala en disminuir 60 dB con respecto a la inicial una vez cesa el sonido provocado por alguna fuente [2]. También se habla de T_{20} y T_{30} para caídas de 20 y 30 dB respectivamente. De hecho, en el presente trabajo se utilizará T_{30} y no T_{60} pues el T_{60} supondría una caída de 60 decibelios y para ello la fuente tendría que emitir a niveles demasiado altos pues el final de la caída debe quedar al menos 10 dB por encima del ruido de fondo. Como se ha dicho previamente, este dependerá de la geometría de la sala y de la capacidad absorbente de las superficies y elementos que la componen, variando así entre sala llena y sala vacía, pero también habrá que tener en cuenta en función del tamaño el tipo de campo y la densidad modal. En un ecograma (figura 1.1), se diferencian 3 zonas denominadas sonido directo, primeras reflexiones, y cola reverberante. El sonido directo es la primera señal que se representa (la primera barra), Las primeras reflexiones se entienden como aquellos rayos sonoros que llegan al oyente con un máximo de 3 reflexiones. La cola reverberante se considera para un número mayor de reflexiones o a partir de los primeros 100 ms y es mayor cuanto mayor es el recinto cerrándose solo en la geometría [3]. Como se puede observar en él, un mayor número de reflexiones supone una menor cantidad de energía, lo cual se relaciona con la propia definición de tiempo de reverberación. Como el T_R se suele representar por bandas de octava o bandas de tercio de octava, es común encontrar en tablas el valor referente a las bandas de 500 Hz y 1000 Hz como promedio, denominado T_{Rmid} , muy utilizado en el estudio de los parámetros de calidad de las salas. Explicar de forma breve que existe otro parámetro importante a la hora de saber la efectividad de un método teórico de cálculo de T_R y es

el tiempo de decaimiento temprano (Early decay time), EDT, y que se define como 6 veces el tiempo que tarda en caer 10 dB el nivel de presión sonora. Teóricamente como se verá, debería coincidir con el T_R en los recintos de cierto tamaño para asegurar una buena difusión del sonido.

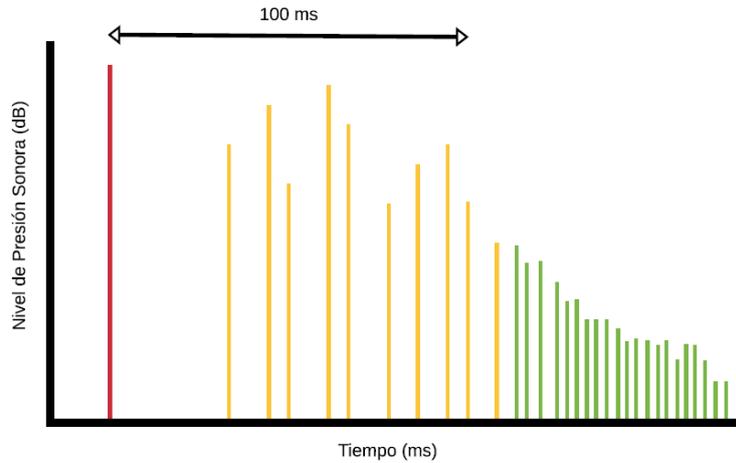


Figura 1.1: Ecograma. En rojo el sonido directo, en amarillo las primeras reflexiones y en verde la cola reverberante.

A continuación se explicarán en orden cronológico las aportaciones más relevantes sobre el cálculo del tiempo de reverberación [4]. En el año 1896 se tiene la primera fórmula aceptada para el cálculo del T_R expuesta por **W. C. Sabine**, cuya ecuación (ecuación 1.1) se pensó suponiendo un campo difuso, pero que asentó la idea de una dependencia proporcional con el volumen e inversamente proporcional a la superficie total del recinto a estudiar.

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha} + 4mV}, \quad \text{con} \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \cdot \alpha_i \quad (1.1)$$

En la ecuación anterior, V es el volumen total expresado en m^3 , S es la superficie total expresada en m^2 , m es la absorción del aire y $\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción medio, el cual puede tomar valores de 0 a 1. Se aprecia como el promediado de α en este caso es aritmético, es decir, siguiendo la fórmula de la media aritmética de una variable. En cuanto a la absorción del aire se ha tenido en cuenta por ser otro factor más que influye en la absorción del sonido aunque es verdaderamente relevante solo en grandes recintos, siendo mayor para altas frecuencias y es dependiente de la temperatura y la humedad relativa. Aun así, se ha tenido en cuenta el cálculo predictivo de los 3 niveles pues sin su influencia los resultados distaban bastante de lo esperado. Su obtención es empírica en función de las condiciones ambientales, por lo que su valor ha ido variando según el recinto y el día de medida. La expresión 1.1 era apropiada para valores de α bajos ($\alpha \leq 0.2-0.3$), es decir, salas que se aproximaban más a ser reverberantes, pero fallaba para valores altos del coeficiente de absorción. Quiriendo mejorar los resultados de Sabine dado que según su fórmula un coeficiente medio de absorción igual a la unidad proporcionaría un tiempo de reverberación distinto de cero, lo cual no tiene sentido físico, llega la aportación de **Eyring** [5, 6], cuyo planteamiento siguió la línea de Sabine, pero valiendo para un $\bar{\alpha} > 0.3$ y un comportamiento inversamente logarítmico, lo cual le llevó a la ecuación siguiente (ecuación 1.2):

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \alpha_{Ey} + 4mV}, \quad \text{con } \alpha_{Ey} = -\ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (1.2)$$

A raíz de la aportación de Eyring, **Millington** (ecuación 1.3) quiso resolver el problema de la asimetría de la absorción, es decir, cuando hay mucha variedad de materiales en el recinto y la diferencia entre los diversos valores de los coeficientes de absorción se hace notar, aunque la ecuación sigue siendo de campo difuso igualmente. De este modo propuso la siguiente ecuación:

$$T_R = \frac{0,16 \cdot V}{-\sum_i S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i) + 4mV} \quad (1.3)$$

La siguiente aportación la hizo **Cremer** (ecuación 1.4) como variante de la de Millington. Cremer elaboró un método para resolver el problema de que cuando la absorción es 1, o superior, el que T_R valga 0, como ocurría en la ecuación de Millington y quiso tener en cuenta el concepto de tiempo de decaimiento temprano a la hora de elaborar su ecuación:

$$T_R = \frac{0,16 \cdot V}{S_{Cre} + 4mV} \quad \text{con } \alpha_{Cre} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \cdot \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{S_i} \sum_j \alpha_{ij} S_{ij}\right)\right) \quad (1.4)$$

Fitzroy más adelante (ecuación 1.5) introduce en su desarrollo la posibilidad de campo sonoro no difuso, por lo que se comienza a separar las superficies y sus coeficientes de absorción correspondientes según las direcciones x, y, z dado que la absorción o la energía ya no posee un reparto homogéneo en su teoría, obteniendo la siguiente expresión:

$$T_R = 0,16 \cdot \frac{V}{S^2} \cdot \left(\frac{-S_x}{\ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \cdot \frac{-S_y}{\ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \cdot \frac{-S_z}{\ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right) \quad (1.5)$$

Kuttruff volviendo a la idea de campo difuso, formula su teoría (ecuación 1.6) teniendo en cuenta la Ley de Lambert relacionando conceptos de luz y sonido, dado que se podía buscar analogías en su comportamiento en conceptos de reflexión y transmisión de ondas. Dicha expresión termina escribiéndose de la siguiente forma:

$$T_R = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot \alpha_{kut} + 4mV} \quad (1.6)$$

donde

$$\alpha_{kut} = \alpha_{Ey} \cdot \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} \cdot \alpha_{Ey}\right) + \frac{\sum_i (1 - \alpha_i)(\bar{\alpha} - \alpha_i) \cdot S_i^2}{S^2 \cdot (1 - \bar{\alpha})} \quad (1.7)$$

Actualmente la normativa utiliza la fórmula de **E. Nilson** (ecuación 1.8), en la norma EN 12354-6:2004. Dicha expresión, para campo no difuso, utiliza un método estadístico energético que supone de una expresión muy compleja. El principal inconveniente que tiene a parte de la complejidad es el hecho de que no cumple una condición que indicó Cremer de que el sistema propuesto para el cálculo teórico del T_R también debería ser capaz de calcular el EDT (tiempo de decaimiento temprano) que se explicará más adelante.

$$T_R = \frac{55,3}{c_0} \cdot \frac{V \cdot (1 - \Psi)}{A} \quad \text{con} \quad A = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^o A_{obj,j} + \sum_{k=1}^p \alpha_{s,k} \cdot S_k \quad (1.8)$$

Finalmente, se llega pues a una de las aportaciones más importantes y actualmente de las más valoradas que es la de **Higini Arau-Puchades** [7]. La fórmula de Arau (ecuación 1.9) permite calcular tanto el T_R como el EDT para campo sonoro no difuso [8,9], cumpliendo así la condición de Cremer. Dicha fórmula compatibiliza el carácter gaussiano del camino libre medio con la aproximación logarítmico-normal de los coeficientes de absorción medio para las paredes perpendiculares, por lo que es especialmente útil en salas cúbicas o rectangulares [10].

$$T_R = \left(\frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \right)^{S_x/S} \cdot \left(\frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \right)^{S_y/S} \cdot \left(\frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right)^{S_z/S} \quad (1.9)$$

En la ecuación anterior, x es la referencia vertical (techo y suelo), y es la horizontal (paredes laterales) y z es la profundidad (fondo y parte trasera). Todas las aportaciones explicadas hasta aquí dan soluciones aproximadas al T_R para casos concretos de geometría de la sala. Uno de los puntos a tener en cuenta en este trabajo será el hecho de intentar no pensar en superficies perpendiculares entre sí, y pensar en el camino recorrido de los rayos sonoros teniendo en cuenta la posición de la fuente, pues es un factor que se ha considerado influyente, y el ángulo de las diferentes superficies con respecto al eje considerado para la fuente en caso de no poder ser unidas por un rayo sonoro directamente y así diferenciar superficies de primera reflexión y de posterior reflexión. De este modo se buscará una ecuación que abarque cualquier geometría.

1.2.2. Coeficientes de absorción y reflexión

El coeficiente de absorción, α , se define como el cociente entre la energía que absorbe y la que incide sobre un material (ecuación 1.10). Su valor va desde cero para un material totalmente reflectante, a 1, para un material totalmente absorbente. Dicho coeficiente varía para cada frecuencia y depende al cien por cien de las propiedades físicas del material.

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_{inc}} \quad r + \alpha = 1 \quad (1.10)$$

El coeficiente de reflexión, r, es sencillamente el restante de α para llegar a la unidad, cumpliendo la relación anterior e indicando la capacidad reflectora de un material. A la hora de hablar de la

absorción, A , de un material, se debe de tener en cuenta tanto α como la superficie. De este modo, la absorción total en un recinto viene definida por la expresión izquierda de la ecuación 1.11, y el coeficiente medio de absorción, $\bar{\alpha}$, por la expresión derecha de la misma ecuación que incluye la superficie total, S_{total} (suma de todas las superficies del recinto):

$$A_{tot} = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \quad ; \quad \bar{\alpha} = \frac{A_{tot}}{S_{total}} \quad (1.11)$$

1.2.3. Parámetros de calidad acústica de salas

Junto con el tiempo de reverberación, en la acústica de salas existen múltiples parámetros acústicos que marcan la calidad acústica de una sala [11]. Estos parámetros pueden hacer referencia a tiempo [s] o a ganancia [dB]. Se comentarán a lo largo de esta subsección los parámetros de ambos tipos que se hayan medido o calculado en el capítulo 3, y su relación con el tiempo de reverberación en caso de que exista.

Tiempo de decaimiento temprano, EDT

El tiempo de decaimiento temprano, EDT, se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que la fuente emisora deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB y, por tanto, es un parámetro temporal. Es un parámetro similar al tiempo de reverberación, solo que en este caso, la caída es solamente de 10 dB y el tiempo obtenido multiplicado por 6, para equipararlo por regla de 3 al T_{60} , por lo que solo en los casos en los que la bajada de T_R fuera lineal, estos dos coincidirían. El EDT suele ser menor, aunque una buena sala ocupada debería tener un EDT y un T_R similares en las bandas de 500 y 1000 Hz. Concretamente y, según Arau-Puchades, para una sala del tipo del nivel 3 de éste trabajo, un buen EDT sería el que se encuentre en un intervalo como $0.9 \cdot T_{mid} \leq EDT \leq T_{mid}$.

Claridad Musical, C_{80}

La claridad musical, C_{80} , es el cociente entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 milisegundos y la que llega después (ecuación 1.12 parte izquierda). Se calcula integrando las presiones sonoras, p , al cuadrado en función de los intervalos temporales descritos. Existe un método definido por L. G. Marshall que supone un promediado de las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz, y el cual se considera el valor más representativo para la claridad. Se espera que dicho promediado esté en el intervalo $-2 \leq C_{80} \leq 2$ según L. G. Marshall y Arau-Puchades para una sala ocupada y entre $-4 \leq C_{80} \leq 0$ para una sala vacía según los mismos autores y Beranek (ecuación 1.12 parte derecha).

$$C_{80} = 10 \cdot \log\left(\frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt}\right); \quad C_{80}(prom.) = \frac{C_{80}(500) + C_{80}(1000) + C_{80}(2000)}{3} \quad (1.12)$$

Claridad de la voz, C_{50}

La claridad de la voz, C_{50} , de forma análoga a la claridad musical es el cociente entre la energía sonora que llega al oyente esta vez durante los primeros 50 milisegundos y la que llega después (ecuación 1.13 parte superior). La energía que llega durante los primeros 50 ms se considera la que abarca al sonido directo y a las primeras reflexiones (recuerdo: primeras reflexiones son $n = 1$ o 2 reflexiones). Se calcula para cada banda de frecuencias desde los 125 Hz hasta los 4 KHz. Dado que es una relación entre energías acústicas, se expresa en escala logarítmica. Al igual que para la claridad musical, también tiene un sistema de cálculo de promedio (ecuación 1.13 parte inferior) . Éste promediado debe proporcionar un valor mayor de 2 dB para ser considerado bueno según L. L. Beranek, Arau-Puchades y Carrión independientemente del tipo de recinto, y a partir de ahí será mejor cuanto mayor sea dicho valor.

$$C_{50} = 10 \cdot \log\left(\frac{\int_0^{0,05} p^2(t)dt}{\int_{0,05}^{\infty} p^2(t)dt}\right) \quad (1.13)$$

$$C_{50}(prom.) = 0,15 \cdot C_{50}(500) + 0,25 \cdot C_{50}(1000) + 0,35 \cdot C_{50}(2000) + 0,25 \cdot C_{50}(4000)$$

Definición, D_{50}

Siguiendo la explicación de los parámetros C_{80} o C_{50} , la Definición, D_{50} , tiene una expresión similar (ecuación 1.14) solo que en este caso, el cociente tiene como denominador la energía total, y no solamente la posterior a los primeros ms que se quieran considerar que le llega al oyente. Ésta ha de ser mayor que 0.50 según Arau-Puchades y Carrión para cada punto de la sala en la que se esté calculando y es mejor cuanto más centrado y frontal sea la fuente (la persona que habla, por ejemplo), por lo que es un parámetro con “directividad”(si la fuente rota, ésta disminuye).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \cdot 100 \% \quad (1.14)$$

Un valor bajo de la definición mostraría que la energía reflejada en los primeros 50 milisegundos es pequeña en relación con la energía reflejada total, lo cual supondría que el recinto es poco íntimo (tiempo de reverberación alto) o muy vivo. Finalmente, decir respecto a estos 3 últimos parámetros explicados se ve como son parámetros de ganancia, pues a pesar de que la definición se puede expresar en %, las cantidades se miden y expresan en decibelios.

Proporción de graves o Calidez (Bass Ratio), B_R

La proporción de graves es la relación entre la energía de reverberación en el rango de frecuencia que abarca de 125Hz a 250 Hz y el rango de frecuencia entre 500Hz y 1000Hz. Viene dada por la siguiente ecuación (ecuación 1.15):

$$B_{Ratio} = \frac{T_R(125Hz) + T_R(250Hz)}{T_R(500Hz) + T_R(1000Hz)} \quad (1.15)$$

Esta proporción marca el refuerzo de frecuencias bajas de la sala y que percibe el oyente, por lo que aporta calidez a la sala y es por ello que a veces recibe ese mismo nombre. Como se observa, es dependiente del T_R convirtiéndose en un parámetro temporal, junto con el brillo explicado a continuación. Según L. L. Beranek, un buen valor para una sala ocupada como la del nivel 3 sería $1.1 \leq B_R \leq 1.3$ s si el $T_{mid} = 2.2$ s o $1.1 \leq B_R \leq 1.5$ s si el $T_{mid} = 1.8$ s.

Brillo, BR

Análogo a la calidez, el brillo es una relación entre la energía de reverberación, pero para las frecuencias altas, por lo que abarca los intervalos desde 500 y 1000 Hz, hasta 2000 y 4000 Hz. Su ecuación queda de la siguiente forma (ecuación 1.16):

$$BR = \frac{T_R(2000Hz) + T_R(4000Hz)}{T_R(500Hz) + T_R(1000Hz)} \quad (1.16)$$

Esta proporción marca el refuerzo de frecuencias altas de la sala y que percibe el oyente. Según L. L. Beranek, un buen valor para una sala ocupada como la del nivel 3 sería $BR \geq 0.9$ s, pero no superior a 1 en general. A continuación se van a explicar otros parámetros referidos a la palabra y su inteligibilidad.

Pérdida de articulación de consonantes, % Alcons

Es un parámetro utilizado exclusivamente en recintos destinados a la palabra y permite básicamente cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. El cálculo se realiza en las bandas de 500 Hz, 1 kHz o 2 kHz. Existen dos opciones de cálculo:

1. Cálculo clásico: los tiempos de reverberación requeridos se calculan mediante la fórmula de Sabine (ecuación 1.1).
2. Cálculo a partir de la curva energía-tiempo: los tiempos de reverberación se calculan mediante el método de Schroeder (la curva promedio mencionada se puede obtener de forma totalmente equivalente a base de integrar todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC, desde un instante de tiempo infinito).

STI (Speech Transmission Index)/RASTI (Rapid Speech Transmission Index)

El STI, es un parámetro asociado también a la inteligibilidad de la palabra. $STI=1$ significa que la inteligibilidad es total, $STI=0$ significa que la inteligibilidad es nula. Se calcula a partir de la reducción de los índices de modulación de la voz debido a la existencia de reverberación y ruido de fondo en la sala. El parámetro RASTI es un parámetro que surge de la simplificación del STI para reducir así el tiempo de cálculo. Se calcula reduciendo el número de bandas de octava y de frecuencias de modulación, fijándose en las bandas de 500 Hz y de 2000 Hz. Uno de los métodos para evaluar la inteligibilidad de la palabra es utilizar pruebas subjetivas. En este trabajo se obtienen ambos índices a partir del software ARTA para la señal tipo sweep. Los valores recomendados en ingeniería acústica para el parámetro RASTI son superiores a 0.65 para una sala ocupada según Carrión, por lo que por

debajo de este no habrá una buena inteligibilidad de la palabra. Los valores recomendados para el parámetro STI son los mismos que para el RASTI, y se pueden recoger en la tabla siguiente:

Valoración Subjetiva	STI/RASTI
Mala	0.0-0.3
Pobre	0.3-0.5
Aceptable	0.5-0.6
Buena	0.6-0.7
Excelente	0.7-1.0

Tabla 1.1: Valores subjetivos estandarizados

Todos estos parámetros vienen marcados por cómo se distribuye el sonido en la sala o recinto en el que se han medido o se desean medir, por lo que dependen de la propagación de éste.

1.3. Teoría sobre la propagación ondulatoria

En todo momento se ha hablado de propagación del sonido o de la energía. Para intentar modificar o mejorar el cálculo del T_R es importante explicar la mecánica ondulatoria que reside tras las ondas sonoras. Las ondas sonoras son ondas longitudinales generadas por fuentes sonoras, cuya generación de sonido se produce por medio de vibraciones que sufre esa fuente. Dicha transmisión se transmite entre partículas adyacentes, es decir, no se desplazan con la perturbación, sino que oscilan alrededor de su posición de equilibrio propagando la perturbación generada por la fuente. Habitualmente, esa transmisión de impulso/fuerza entre partículas que se termina denominando campo sonoro, se expresa mediante la presión, P , que equivale a la fuerza por unidad de superficie. Esta propagación se considera esférica teniendo como centro la fuente sonora, aunque a largas distancias, los frentes de onda se pueden considerar planos. Estos frentes de onda son los que representan el conjunto de rayos sonoros que se mencionan para hacer referencia a las diferentes reflexiones en la sala (Figura 1.2).

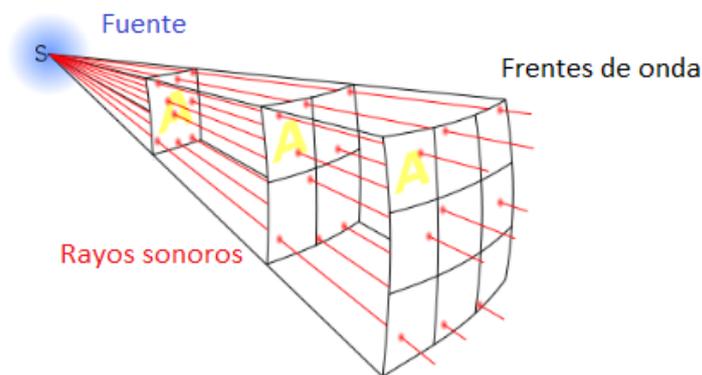


Figura 1.2: Frentes de onda esféricos

Este último hecho referido a los frentes de onda, y teniendo en cuenta que el sonido parte de una fuente puntual, permite trabajar con el conocido ángulo sólido (ecuación 1.17). Éste ángulo en la situación que se está describiendo es el ángulo espacial que abarca una superficie vista desde la fuente, que se corresponde con la superficie espacial limitada por las rectas que se proyectan desde el objeto

hacia el observador [12]. Tenerlo en cuenta en el cálculo de parámetros acústicos es una manera de tener en cuenta la posición de la fuente, dado que éste depende de la distancia a la fuente.

$$\Omega = \int_S \frac{e_r \cdot dS}{r^2} \quad (1.17)$$

En la ecuación anterior e_r indica la dirección radial, y junto con dS representa la proyección del vector dS en la dirección radial. El denominador r^2 indica la disminución con el cuadrado de la distancia a la fuente como se intuía anteriormente. De hecho, la ecuación anterior podría reescribirse un tanto simplificada teniendo en cuenta la superficie entre el cuadrado de la distancia a la fuente. Este concepto puede servir en el desarrollo de éste trabajo a la hora de diferenciar entre primeras reflexiones y el resto, pues aquellas superficies no abarcables por un ángulo sólido, serán de segunda reflexión como mínimo. De este modo, ya se puede empezar a diferenciar términos con superficie y términos con ángulo sólido en la ecuación de cálculo de T_R . A pesar de que se utilizará como ecuación de partida la ecuación de Eyring que es de campo difuso, el objetivo de utilizar el ángulo sólido es el de tener en cuenta la posición de la fuente y, por tanto, las distancias de las superficies a la fuente.

Como se ha mencionado en el punto 1.1 con respecto a los objetivos, algunos de estos están centrados en ese posible nuevo camino del cálculo teórico del T_R , en el que se tendrá en cuenta los ángulos que forman las superficies con respecto a la fuente y la distancia de la fuente a dichas superficies. Los recintos que se utilizarán para comparar resultados serán dos salas que tienen por objetivo ser remodeladas para convertirse en estudio de radio de la Escuela Politécnica Superior de Gandía como nivel 1, una sala de conferencias recién construida en Alcoy como nivel 2 y un auditorio recién construido de Beniarbeig como nivel 3, en los que se compararán tanto datos medidos con los métodos clásicos y los resultados que ofrecería la nueva ecuación del método presentado en los puntos 3.4 y 3.5 de este trabajo. En dichos estudios se tendrá en cuenta el cómo afectan los modos propios de las salas para así poder “descartar” o no tener tan en cuenta alteraciones que los resultados muestren como abruptas a baja frecuencia sobre todo (bandas de 63, 125 y 250 Hz).

Dentro de la propagación ondulatoria de las ondas acústicas en recintos cerrados (acústica arquitectónica), se diferencian 3 teorías que son la ondulatoria, al estadística y la geométrica [13–15]. **La teoría ondulatoria** centra su estudio en la ya explicada propagación ondulatoria, es decir, en conceptos como velocidad en el medio, reflexión y refracción, comportamiento ondulatorio, entre otros y centrándose en el concepto de frente de onda. Ésta teoría solo ha podido ser resuelta para casos muy concretos como las salas rectangulares con condiciones de contorno muy sencillas, debido a que la resolución analítica de la ecuación de ondas es muy compleja por lo que en la práctica no se suele utilizar. La segunda de las teorías es **la teoría estadística** la cual se trabaja para espacios cerrados de cierto tamaño (desde salas de conferencias a auditorios o polideportivos). Se considera una fuente sonora generadora de un sonido que se propaga en frentes de onda esféricos, los cuales transportan energía sonora que colisiona con las distintas superficies del recinto. Inicialmente mantiene la naturaleza ondulatoria, pero pasado un cierto tiempo el computo total de ondas emitidas y que han interactuado con las superficies forman un campo normal gaussiano al mezclarse entre ellas. Esta teoría contienen parte de la teoría ondulatoria y parte de la geométrica, como se verá a continuación. Hasta aquí las 2 teorías consideradas más físicas, por lo que falta la tercera de las teorías, que es **la teoría geométrica**, en la que el frente de onda se estudia como los conocidos rayos sonoros, los cuales se representan como una recta que indica la dirección de propagación del frente de onda, por lo que no tienen identidad física como tal. La idea de rayo sonoro y su uso es más factible cuanto mayor sea la frecuencia, pues así será más sencillo suponer que los frentes de onda son paralelos entre sí, pudiendo trabajarlos como un rayo

sonoro. Aun así, esta teoría trabaja únicamente con reflexiones especulares, dejando fenómenos como la difracción fuera de ella, lo cual la hace limitada para estos estudios.

Tras esta explicación de las tres teorías, se observa como en el desarrollo de los 3 niveles que abarcan este trabajo, la teoría utilizada será la estadística dado que además es la que se utiliza en las teorías previas sobre tiempo de reverberación.

1.3.1. Modos propios

Para el cálculo del T_R en una sala también se ha de tener en cuenta el tamaño de la sala, pasando así de teoría modal [16](salas pequeñas), a campo difuso (salas de tamaño medio) y a campo no difuso (salas de tamaño grande). La teoría modal se basa en la existencia de los modos propios de una sala, o mejor, la densidad de estos, es decir, la cantidad de modos según la frecuencia en la que nos encontramos. Es por ello que se encuentra en la ecuación siguiente la densidad de modos propios (ecuación 1.18):

$$D(f_0) = \frac{4 \cdot \pi \cdot V \cdot f_0^2}{c^3} + \frac{\pi \cdot S \cdot f_0}{2 \cdot c^2} + \frac{L}{8 \cdot c} \quad (1.18)$$

donde V es el volumen de la sala, S la superficie total de la sala, L la máxima longitud existente en la sala, c es la velocidad del sonido que se considerará de 343 m/s a lo largo de todo el trabajo (justificado en el siguiente párrafo) y f_0 la frecuencia que en la que se quiera estudiar la densidad modal. Además de la densidad modal, se puede conocer la frecuencia máxima a partir de la cual los efectos modales ya no tienen verdadero efecto sobre la distribución energética en la sala en función de la frecuencia (ecuación 1.19).

$$F_{max} = 1849 \cdot \sqrt{\frac{T_{Rmid}}{V}} \quad (1.19)$$

De este modo, se podrá observar en los resultados que alteraciones no deseadas producidas en las mediciones de T_R pueden ser provocadas por los mencionados modos propios, conociendo la frecuencia a partir de la cual no es necesario tenerlos en cuenta y viendo la densidad modal de estos en las bandas de frecuencia hasta 1000 Hz, pues por encima de esta los modos propios no se tienen porqué tener en cuenta. Antes de pasar a la metodología, especificar que se ha elegido el valor mencionado para la velocidad del sonido por ser un valor estandarizado para una temperatura de 20°C y una humedad relativa de 50 %. Una forma más metódica de haberla tenido en cuenta habría sido calculándola para cada caso de humedad y temperatura diferente con la ecuación siguiente:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}} \quad (1.20)$$

El coeficiente γ es el coeficiente de dilatación adiabática, R la constante universal de los gases, T la temperatura, M la masa molar, P la presión y ρ la densidad. El paso que se marca con la flecha es la introducción de la ecuación de los gases ideales, dado que el aire se puede tratar como un gas ideal. Como se observa en la ecuación anterior, por un lado a mayor temperatura mayor sería la velocidad

del sonido, mientras que el aumento de la humedad supone un aumento de la densidad de éste, lo que supone una menor absorción por parte del aire y en conclusión una mayor velocidad del sonido también. También mediante la conocida relación más sencilla (ecuación 1.21) que nos da un aumento de la velocidad del sonido de 0.6 por cada grado centígrado en la escala Celsius:

$$c = 331 + 0,6 \cdot T \quad (1.21)$$

A pesar de no haber utilizado ninguna de estas dos ecuaciones, se tendrán en cuenta en proyectos futuros para perfeccionar los resultados obtenidos. Finalmente, se da paso al capítulo de metodología en el que se explicarán las metodologías llevadas a cabo en los 3 niveles de estudio y en el desarrollo teórico del autor.

Capítulo 2

Metodología

En lo correspondiente a este capítulo se hará referencia a la metodología utilizada en cada parte del análisis y desarrollo experimental (capítulo 3) del presente trabajo. Ésta abarca lo que se denominarán niveles, que evolucionarán de tamaño pequeño a tamaño grande y de poca audiencia a gran audiencia, siendo éstos las aulas de la EPSG (Nivel 1), la sala de conferencias en Alcoy (Nivel 2) y el auditorio en Beniarbeig (Nivel 3). Esto incluye el criterio de selección de posición de micrófono y fuente en las medidas, de selección de punto de caída del nivel de presión sonora para la elección del punto de comienzo de cálculo del T_R , las especificaciones de cada nivel y recinto, y los pasos a seguir en el desarrollo teórico-empírico final del trabajo.

2.1. Sobre las medidas

Para los 3 niveles (estudio de radio en Gandía, sala de conferencias en Alcoy y auditorio en Beniarbeig) se utilizaron en total los materiales e instrumentos de medida que se itemizan a continuación:

- Micrófono independiente: Brüel & Kjaer 4190-L-001.
- Alimentación: Brüel & Kjaer DeltaTron WB1372.
- Preamplificador micrófono: Brüel & Kjaer Type 2671.
- Tarjeta de sonido: Behringer U-Phoria UMC202HD.
- Fuente dodecaédrica: Altavoz omnidireccional de alta potencia, modelo 4296 Brüel & Kjaer.
- Fuente: Altavoz tipo 4224 Brüel & Kjaer.
- Amplificador fuente: Brüel & Kjaer Type 2716 Power Amplifier.
- Sonómetro: Brüel & Kjaer 2270.
- Micrófono del Sonómetro: Brüel & Kjaer, Micrófono de campo-libre tipo 4189 prepolarizado de 1/2 ”.
- Ordenador portátil VAIO con software de medida y análisis ARTA.

Concretamente, la única diferencia es que para Alcoy se utilizó la fuente 4224, mientras que en Gandía y Beniarbeig se utilizó la fuente dodecaédrica. Las medidas tomadas para todos los niveles fueron tanto con señal de ruido rosa medida con sonómetro como con señal tipo sweep analizada con

ARTA para la obtención del T_R . El T_{20} y EDT también con ruido rosa, pero solo en los *niveles 2 y 3* y, solamente con ruido tipo sweep para el resto de parámetros de calidad. El punto de caída en la curva para el sonómetro es bastante preciso a -5 dB, es decir, mide el T_R como es de esperar, pero en el ARTA no tiene porqué, pues empieza en el intervalo de -2 a -3 dB. Es por ello que todos los resultados de ARTA han sido seleccionados haciendo todo lo posible por manualmente ajustar los intervalos de T_R de -5 a -35 dB, y así obtener el resto de parámetros de calidad teniendo en cuenta la caída elegida manualmente.

2.1.1. Nivel 1: Estudio de radio en Gandía

Este primer nivel se centra en las medidas realizadas sobre los espacios que se desean adecuar como estudio de radio situados en el edificio E de la Escuela (figura 2.1), concretamente en las aulas 706 (sala de control) y 707 (sala de grabación). La sala 706 tiene un volumen de $14.61 m^3$ y la sala 707 un volumen de $30.95 m^3$.



Figura 2.1: Localización en el campus

Las medidas se realizaron en el mes de Enero de 2020 en horario de tarde y el mes de Julio de 2020 en horario de mañana. A continuación, se muestra el plano de las aulas mencionadas donde la posición de los micrófonos y fuente se reduce a dos posiciones reales de micrófono en la sala 706 y a cuatro posiciones en la sala 707 dadas las dimensiones de los recintos. Las posiciones de micrófono se representan por puntos azules, mientras que las de fuente por un triángulo rojo.

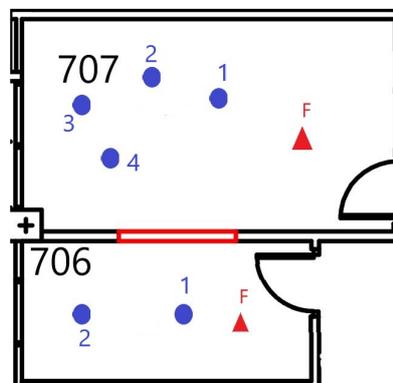


Figura 2.2: Posiciones de medida para nivel 1

El motivo de la ubicación de los micrófonos fue en el caso de la sala 706, la posición aproximada del técnico de sonido, y en la 707 las posiciones de los/as locutores/as. Dadas las dimensiones de ambos recintos, la posición de la fuente, a pesar de que se ha de tener en cuenta, se situó de tal manera que guardara la distancia necesaria con los micrófonos y las superficies según la norma UNE EN ISO 3382-2:2008. Parte de la instrumentación así como uno de los recintos a estudiar en este primer nivel 1 se aprecian en la siguiente figura (figura 2.3), como la fuente dodecaédrica, el micrófono independiente o la tarjeta de sonido.



Figura 2.3: Sala 707 del Nivel 1

Como se aprecia en la figura 2.3, correspondiente al segundo día de medida, existía mobiliario en los recintos del nivel 1, lo cual puede afectar a las medidas, pero dada la poca cantidad de éste que era, se espera que no significativamente. En todos los niveles y recintos se hicieron medidas de humedad y temperatura antes y después de las medidas. Respecto a los días de medida para la radio, las condiciones ambientales fueron las siguientes:

	Temperatura [°C]	Humedad [%]
Inicio medidas Rosa	24.0	48.4
Fin medidas Rosa	22.8	50.0
Inicio medidas Sweep	30.0	72.2
Fin medidas Sweep	31.3	71.3

Tabla 2.1: Condiciones ambientales de medición Nivel 1

2.1.2. Nivel 2: Sala de conferencias en Alcoy

Para este segundo nivel se realizaron mediciones en dos días diferentes en los meses de Octubre y Noviembre de 2020, respectivamente, en una sala de conferencias de 81 asientos situado en la localidad Alicantina de Alcoy (Figuras 2.4 y 2.5). El volumen de éste recinto es de $329.1 m^3$. La diferencia entre los dos días de medida en lo que a la sala se refiere radica en que en el día 1 de medida faltaban por poner mobiliario como la puerta de la sala, la ventana de la sala de control y las butacas estaban tapadas con una superficie de plástico, mientras que el día 2 de medida estaba la obra 100 % finalizada.



Figura 2.4: Imágenes Alcoy día 1 de medida



Figura 2.5: Imágenes Alcoy día 2 de medida

El cambio de estado del recinto se denominará de aquí en adelante para el día sin acabar en Octubre como “sin fondo” y para el día de obra finalizada en Noviembre como “con fondo”. Las posiciones de fuente y receptor para sin fondo y con fondo elegidas se pueden observar en la figura 2.6. en la que se observa cómo son las mismas y están basadas en la simetría de la sala. Con un triángulo rojo se marca la posición de la fuente, y con círculos verdes las posiciones de micrófono, que fueron 6 en este caso. Las condiciones ambientales para los dos días de medida fueron las mostradas en la tabla siguiente (tabla 2.2) donde SF es sin fondo y CF es con fondo:

	Temperatura [°C]	Humedad [%]
Inicio medidas SF	22.6	48.9
Fin medidas SF	22.5	48.6
Inicio medidas CF	21.8	48.0
Fin medidas CF	18.7	59.0

Tabla 2.2: Condiciones ambientales de medición Nivel 2

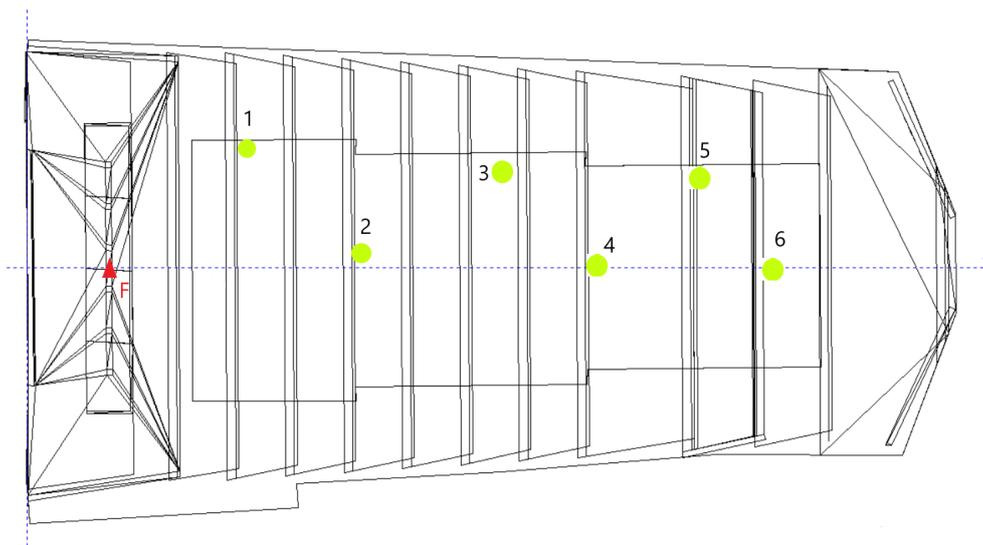


Figura 2.6: Posiciones de medida para nivel 2

2.1.3. Nivel 3: Auditorio en Beniarbeig

El recinto del nivel 3 es un Auditorio con 189 butacas distribuida en 3 zonas de audiencia, situado en el pueblo de Beniarbeig, en la provincia de Valencia (figura 2.7). Su volumen es de 3113 m^3 y las medidas realizadas fueron en dos días también, en los meses de Julio y Octubre de 2020. En este caso, la diferencia en los días de medida reside en el hecho de que en Julio no estaban puestas las butacas, mientras que en Octubre sí. La figura 2.7 se corresponde con el día de medida de Octubre, a obra finalizada prácticamente.



Figura 2.7: Auditorio de Beniarbeig

Para el caso que atañe este subapartado, se observa en la figura 2.8 los puntos de posición de micrófono en círculos azules y naranjas. Los azules hacen referencia a las posiciones sin butacas, mientras que los naranjas son con butacas puestas. La posición de la fuente viene representada por un triángulo rojo, y se sitúa en medio del escenario.

En la figura 2.9 están representadas las posiciones para la medida de los parámetros de calidad

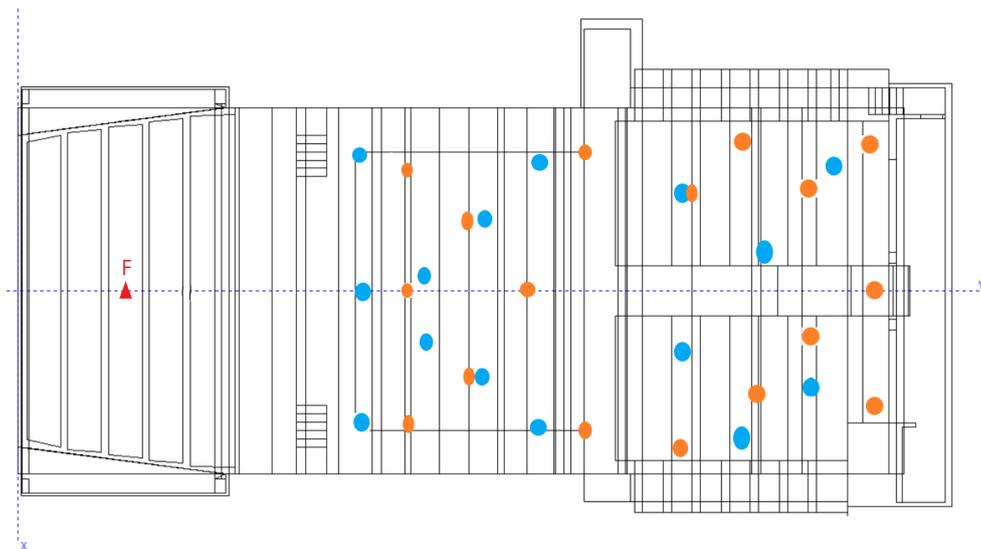


Figura 2.8: Posiciones de micrófono y fuente para señal tipo rosa

con señal tipo sweep. Los cuadrados verdes son las posiciones respetadas en ambos días de medida, mientras que en el segundo día se colocaron 2 posiciones adicionales, que son la 9 y la 10, representadas por cuadrados lilas. La posición de la fuente viene representada por un triángulo rojo, y se sitúa en medio del escenario.

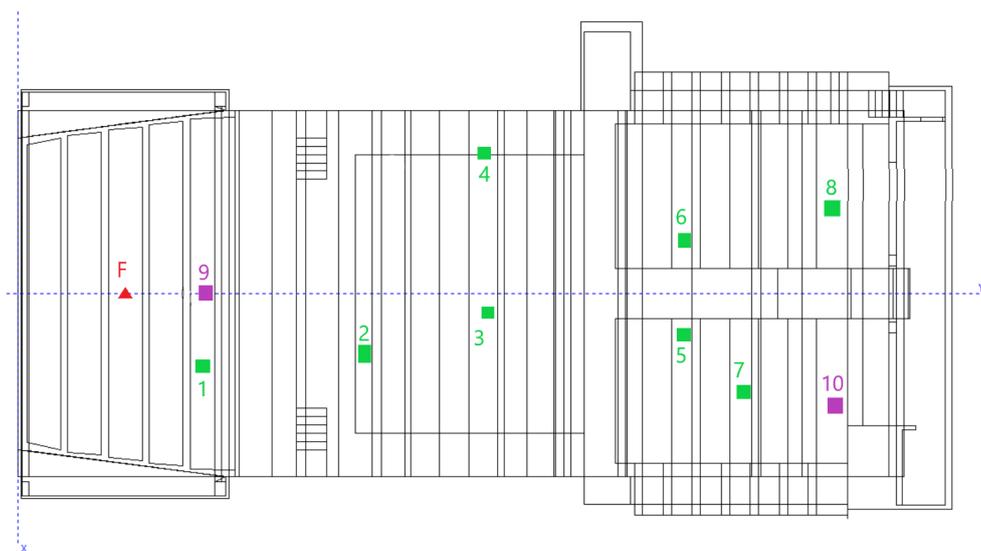


Figura 2.9: Posiciones de fuente y micrófono para señal tipo sweep

La altura de los micrófonos para la situación con butacas fue de 1.20 m, simulando la altura de los asistentes sentados, mientras que para las medidas sin butacas fue de 1.40 m. La posición de fuente tenía una altura de 1.75 m, considerando este punto el punto medio de la fuente dodecaédrica. Solamente se seleccionó una posición de fuente pues se consideró suficiente para imitar la posición de los músicos en el escenario, dado que es un recinto orientado a la música y al canto, además de que previamente se realizaron mediciones del nivel de presión sonora para asegurar una adecuada cantidad de sonido en todo el recinto. Las condiciones ambientales de los días de medida aparecen en la tabla siguiente:

	Temperatura [°C]	Humedad [%]
Inicio medidas SB	30.5	75.0
Fin medidas SB	31.7	76.4
Inicio medidas CB	22.0	58.3
Fin medidas CB	24.3	55.5

Tabla 2.3: Condiciones ambientales de medición Nivel 3

En la tabla anterior SB hace referencia al día de medida 1, sin butacas, mientras que CB hace referencia al día 2 de medida, con butacas.

2.2. Sobre los cálculos

Para los 3 niveles, el procedimiento de cálculo ha sido el mismo. Los datos medidos se han clasificado e introducido en el software de cálculo MATLAB para la correspondiente representación y análisis gráfico. Los cálculos para los métodos clásicos se han trabajado en el mismo software utilizando las fórmulas correspondientes que proporcionaba la literatura e introduciendo las superficies medidas y los coeficientes de absorción dados por los materiales. Los valores utilizados para dichos coeficientes han sido contrastados por diferentes bases buscando el valor más cercano en caso de no ser conocido, aunque en la mayoría de casos eran proporcionados al autor.

2.3. Sobre el estudio teórico y la formulación empírica

En lo que a la metodología sobre el estudio teórico se refiere, se comenzó con una larga lectura y estudio sobre el estado del arte referido a las fórmulas existentes sobre el cálculo del tiempo de reverberación. El siguiente paso fue el de comenzar a tener en cuenta variables que se consideraron importantes hasta desarrollar la fórmula empírica explicada en el punto 3.4. Finalmente, se introdujo en MATLAB con los coeficientes de absorción y las superficies correspondientes a los 3 niveles para comparar con los datos medidos y los métodos clásicos. Para este caso de estudio, se ha intentado perfeccionar al máximo cualquier distancia introducida en las fórmulas para conseguir la mayor exactitud en el cálculo. Se seleccionó la ecuación de Eyring por ser más general que la de Sabine y así partir de una relación más genérica a una más concreta en base a los parámetros que el autor quiso considerar más relevantes.

Capítulo 3

Análisis experimental

El análisis experimental de este trabajo contiene tanto una parte experimental como una semi-teórica. La primera parte del análisis consiste en las medidas realizadas en el estudio de radio de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, en la planta 7 del edificio E concretamente. La segunda parte se corresponde con las medidas realizadas en una sala de conferencias de Alcoy y la tercera parte se centra en las medidas en el auditorio de Beniarbeig a obra finalizada, con y sin butacas, y sin público, es decir, a sala vacía, para la toma de mediciones de parámetros acústicos. Para los tres recintos se tienen las subsecciones del análisis de las medidas. Una vez se tienen todos estos datos, se procede a parte a realizar un análisis teórico de los métodos clásicos para el cálculo del tiempo de reverberación, buscando una forma teórica de mejorarlos a pesar de que fueron propuestos para campo difuso algunos y otros para campo no difuso. Finalmente, se hará una comparación entre los resultados de las medidas con algunos de los métodos clásicos y con el método formulado en el presente trabajo. De cara a los resultados de tiempo de reverberación y parámetros de calidad adelantar que **la precisión de los parámetros que se obtienen con el sonómetro es de 0.01, mientras que la precisión de los que parámetros que se obtienen del ARTA es de 0.001, permitiendo redondear todos a una precisión de dos decimales. Aun así se han redondeado los parámetros parámetros a 1 decimal, para facilitar la interpretación de los parámetros.** También cabe mencionar que todos los parámetros han sido medidos a sala vacía aunque en algunas representaciones se indiquen los valores esperados a sala ocupada. Esto se hace por ver en que punto se encuentra un recinto y que es lo que querría alcanzar con la audiencia correspondiente (es decir, con la sala ocupada).

3.1. Nivel 1: Estudio de Radio en Gandía

En primer lugar se estudiarán los modos propios de los recintos de este nivel para ver cómo afectan ciertas frecuencias al análisis posterior . Se ha hecho uso de las ecuaciones 1.18 y 1.19, obteniendo los siguientes resultados para las 5 primeras bandas de octava y el valor máximo a partir del cual la teoría modal puede dejar de tenerse en cuenta para las salas de control y de grabación:

	Control	Grabación
D(63)	1	2
D(125)	9	19
D(250)	71	151
D(500)	569	1205
D(1000)	4550	9638

Tabla 3.1: Densidad modal Nivel 1

con una **frecuencia máxima de modos de 528 Hz para la sala de control y 288 Hz para la sala de grabación**. Por tanto, a la hora del análisis, los resultados mostrados para tiempo de reverberación y otros parámetros temporales por debajo de la banda de 500 Hz para la sala de control y por debajo de la banda de 250 Hz para la sala de grabación se analizarán teniendo en cuenta que pueden verse afectados por los modos propios de las salas.

Medida de T_R :

En primer lugar, la gráfica de las medidas correspondiente a ambas salas con ocupación vacía para ambos métodos, ruido rosa y ruido sweep, de tiempo de reverberación, T_R , junto con el valor esperado de tiempo de reverberación medio que nos da la literatura para éste tipo de salas (bandas de 500 Hz y 1000 Hz) para la sala ya ocupada y, así, hacer una idea del valor buscado de T_R (Figura 3.1). También se muestra el valor de T_{Rmid} de ambos recintos que es el que se busca que se asemeje al esperado que se acaba de explicar. Como el resultado final que se muestra es un promediado, el hecho de más posiciones para un sonido que para otro no afecta en el resultado.

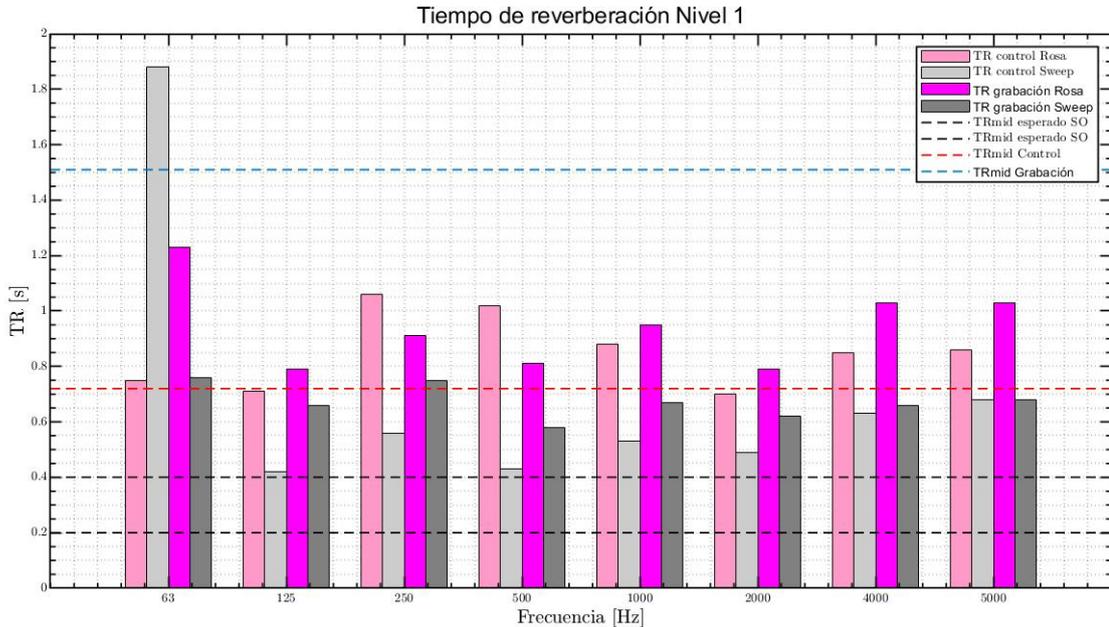


Figura 3.1: Tiempo de reverberación recintos Nivel 1

Los valores de los gráficos anteriores correspondientes a las medidas son los mostrados en la tabla 3.2. Como se observa en el gráfico anterior, la literatura (Carrión) recomienda para este tipo de salas un T_R de 0.2-0.4 s, el cual dista notablemente de los datos medidos, lo que lleva a pensar en la necesidad de realizar un buen acondicionamiento acústico de ambos recintos para convertirlos verdaderamente en estudio de radio. Para estos primeros resultados se aprecia una clara distinción respecto al valor promedio en la banda de más bajas frecuencias para la sala de control, es decir, hay diferencias notables entre ambos tipos de señal hasta los 500 Hz. Esta diferencia puede deberse como se había comentado previamente a los modos normales de la sala debido a su tamaño, pues el aumento en la densidad de modos es notable sobretodo a partir de esta banda. El T_{Rmid} ha sido calculado para cada una de los 3 niveles como promedio entre las bandas de 500 Hz y 1000 Hz para una señal, después para la otra, y luego promediando ambos.

f [Hz]	Sonómetro Control [s]	ARTA Control [s]	Diferencia [s]	Sonómetro Grabación [s]	ARTA Grabación [s]	Diferencia [s]
63	0.8	1.9	1.1	1.2	0.8	0.6
125	0.7	0.4	0.3	0.8	0.7	0.1
250	1.1	0.6	0.5	0.9	0.8	0.1
500	1.0	0.4	0.6	0.8	0.6	0.2
1000	0.9	0.5	0.4	1.0	0.7	0.3
2000	0.7	0.5	0.2	0.8	0.6	0.2
4000	0.9	0.6	0.3	1.0	0.7	0.3
5000	0.9	0.7	0.2	1.0	0.7	0.3

Tabla 3.2: T_R recintos Nivel 1

En la tabla anterior se observan dos columnas referidas a diferencia entre los resultados obtenidos por ambas señales. Esta diferencia se hace para tener en cuenta las variaciones en los resultados y observar su posible dependencia con el origen sonoro de la perturbación, es decir, observar como según el tipo de ruido se obtiene un valor u otro. Hay que tener en cuenta que los resultados con ruido rosa se hicieron sin ningún tipo de mobiliario, mientras que los de tipo sweep si que había un mínimo mobiliario, por lo que tampoco se busca sacar conclusiones concluyentes de esas diferencias, aunque parecía oportuno mostrarlas. Para el resto de parámetros de calidad se tiene lo referido a las siguientes tablas e imágenes que se corresponderán únicamente con señal tipo sweep. Los datos obtenidos con ARTA son medidos directamente, es decir, extraídos por el software. Se han representado a partir de este punto los gráficos para ambas salas en uno solo para cada parámetro para evitar una aglomeración de resultados.

Medida de T_{20} :

El tiempo de caída de 20 decibelios (Figura 3.2) también muestra esa gran diferencia en la sala de control como era de esperar pues sigue una progresión previa al tiempo de reverberación. Tanto para este parámetro como para los siguientes, no tiene sentido calcular la diferencia entre ambos valores pues corresponden a recintos diferentes. En este caso el valor esperado a sala ocupada se ha considerado menor basándose en una regla de 3 con respecto al valor esperado de T_R , por lo que da un valor esperado un tanto menor.

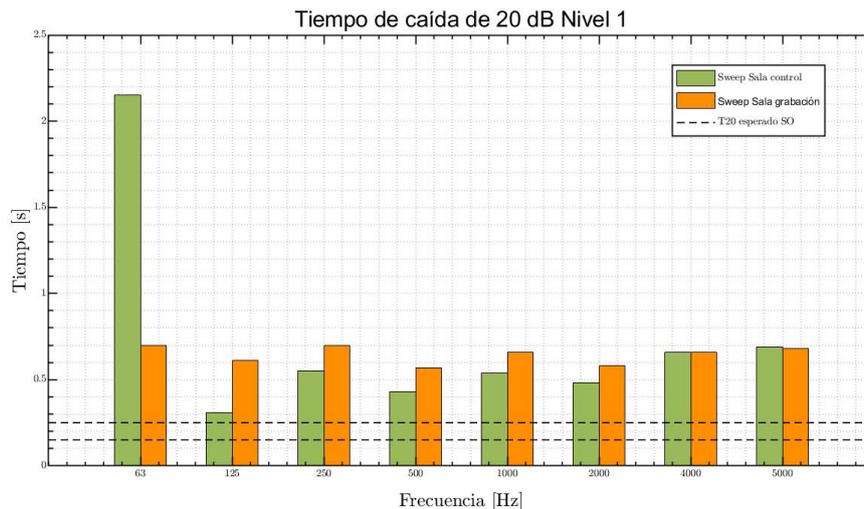


Figura 3.2: Tiempo de caída de 20 dB recintos Nivel 1

Viendo los valores de la siguiente tabla (tabla 3.3) se aprecia como todos los valores se muestran por encima de 0.3 s, mostrando que la reverberación de la sala es todavía grande teniendo en cuenta el rango y, por tanto, el valor que se espera para la finalidad del recinto. Aun así, es mejor para la de control que para la de grabación.

f [Hz]	Sala de Control [s]	Sala de Grabación [s]
63	2.2	0.7
125	0.3	0.6
250	0.5	0.7
500	0.4	0.6
1000	0.5	0.7
2000	0.5	0.6
4000	0.7	0.7
5000	0.7	0.7

Tabla 3.3: T_{20} recintos Nivel 1

Medida de EDT:

Dado que el EDT hace referencia a la caída de los primeros 10 dB, pero su valor medio se espera similar al de T_R como se vio en la introducción teórica para este tipo de recintos, utilizando los mismos intervalos de valor esperado a sala ocupada, es de esperar que dado que marca un tiempo menor, se ajuste mejor al intervalo esperado como ocurre en alguna banda.

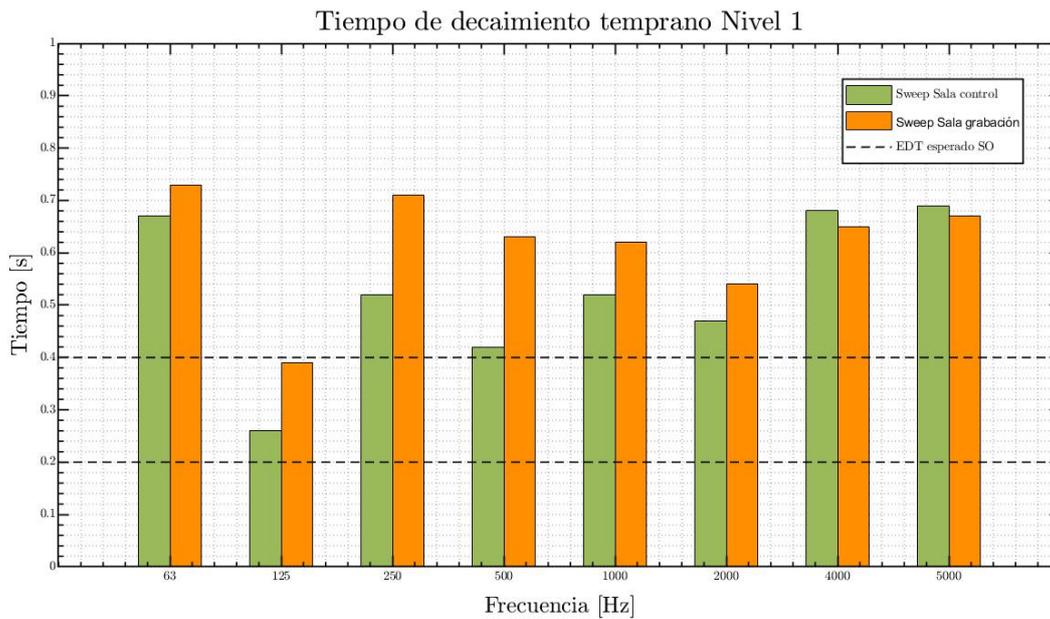


Figura 3.3: Tiempo de decaimiento temprano recintos Nivel 1

Al igual que ocurría con T_{20} , según que banda de octava en la medición se muestran cambios notables frente al resto de las bandas. Se observa como efectivamente se requiere de acondicionamiento acústico en ambos recintos pues están fuera del intervalo esperado la mayoría de bandas, a pesar de que los valores marcados como esperados son para sala ocupada (aunque en este tipo de salas no es un valor con excesivo cambio debido a los pocos ocupantes que tienen). A continuación la tabla con los datos correspondientes a esta gráfica.

f [Hz]	Sala de Control [s]	Sala de Grabación [s]
63	0.7	0.7
125	0.3	0.4
250	0.5	0.7
500	0.4	0.6
1000	0.5	0.6
2000	0.5	0.5
4000	0.7	0.7
5000	0.7	0.7

Tabla 3.4: EDT recintos Nivel 1

Dado que tienen características similares, pero la sala de grabación es más grande que la de control, los valores temporales son generalmente mayores o idénticos en ésta primera. A continuación se procede a mostrar los parámetros que se relacionan más con la energía en lugar de con el tiempo. Para dichos parámetros las representaciones son por posición (2 para sala de control y 4 para sala de grabación), y no por banda de frecuencia, pues su mejora o empeoramiento no es un promedio espacial (posiciones) sino frecuencial (en una posición las bandas que le afecten).

Medida de C_{80} :

Para el caso de la claridad musical, ningún valor se encuentra en el límite esperado ni a sala ocupada ni a sala vacía (Figura 3.4). Todas las posiciones muestran un comportamiento muy externo al rango esperado y muy parecido entre ellas, como era previsible dada la acústica de los recintos y el tamaño de éstos. Por suerte, dado que es un estudio de radio, no es el parámetro más significativo de este nivel, pues la palabra lo es más que la música:

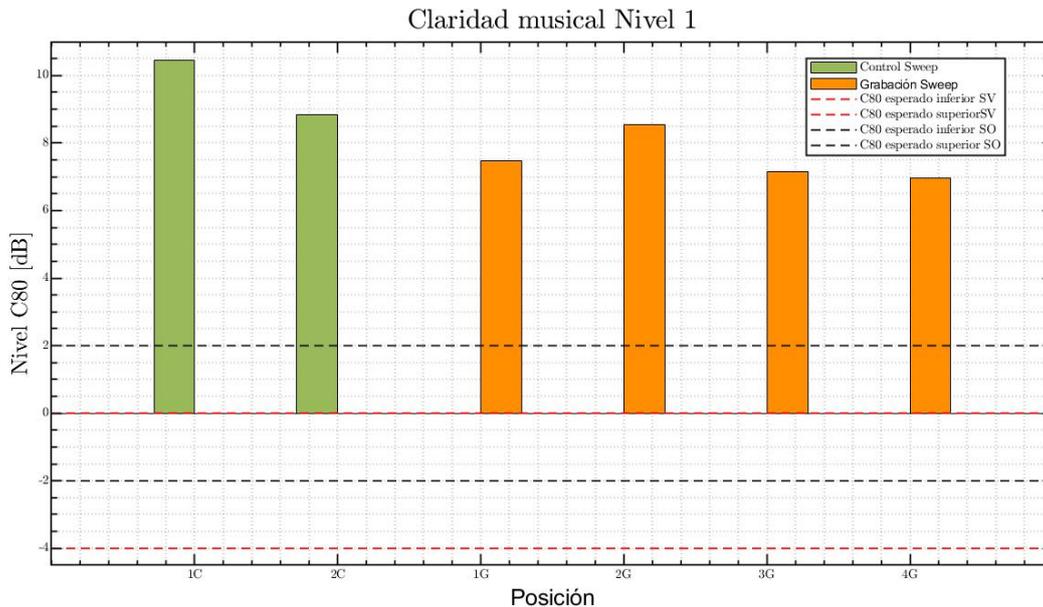


Figura 3.4: Claridad musical recintos Nivel 1

A continuación la tabla de los valores obtenidos en las mediciones de la claridad musical. Se representan coloreadas en naranja claro/amarillo las bandas de frecuencia más relevantes de éste parámetro, que utilizando la ecuación 1.12. permitirán calcular el valor de cada posición. También se representa en la última fila el promedio resultado que se aprecia gráficamente en la figura anterior (Figura 3.4):

f [Hz]	1C [dB]	2C [dB]	1G [dB]	2G [dB]	3G [dB]	4G [dB]
63	1.8	-2.7	1.7	1.6	-3.5	-2.8
125	11.3	12.9	17.6	9.2	11.6	1.7
250	7.0	15.8	12.4	9.6	5.3	7.4
500	12.1	9.9	8.5	8.4	8.0	8.0
1000	8.8	7.2	6.8	7.7	5.3	4.7
2000	10.4	8.3	7.1	9.6	8.2	8.1
4000	7.2	6.5	7.7	7.9	5.4	6.1
5000	7.8	6.3	6.3	6.9	6.2	5.6
Promedio	10.5	8.8	7.5	8.6	7.2	7.0

Tabla 3.5: C_{80} recintos Nivel 1

El promedio de las posiciones total nos da una claridad musical de **9.6 dB** para la sala de control y de **7.5 dB** para la sala de grabación, igualmente quedan muy por encima de los valores esperados buscados para la sala, por lo que efectivamente requerirá de cierto acondicionamiento acústico, a pesar de no ser un parámetro predominante en este tipo de recinto.

Medida de C_{50} :

La claridad de la voz es más importante que la claridad musical en este nivel 1, dado que se trata de un estudio de radio. En la figura 3.5 se aprecia que en ambos recintos se puede considerar positiva, pues está por encima del valor esperado explicado en la introducción teórica. Dado el bajo acondicionamiento acústico y el aumento de volumen de la sala de grabación con la de control, es de esperar que en promedio sea algo inferior la claridad de la voz en éste recinto.

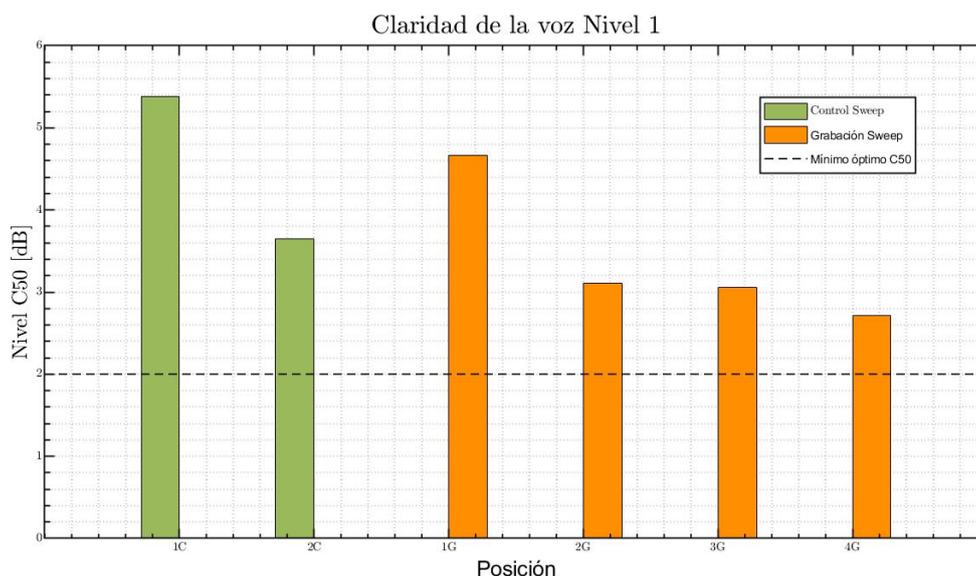


Figura 3.5: Claridad de la voz recintos Nivel 1

En la tabla 3.6 se aprecian todos los valores, con las bandas frecuenciales más relevantes resaltadas nuevamente, las cuales son las que afectan al promedio obtenido según la ecuación 1.13 parte inferior y que es el representado en la figura 3.5.

f [Hz]	1C [dB]	2C [dB]	1G [dB]	2G [dB]	3G [dB]	4G [dB]
63	-3.0	-3.8	-1.2	-1.8	-5.8	-3.8
125	5.2	7.7	14.2	4.9	4.4	-1.2
250	3.6	10.5	7.7	8.1	3.4	1.2
500	6.8	6.1	7.0	4.8	5.9	2.5
1000	5.3	1.6	4.8	0.0	0.7	0.5
2000	5.9	4.2	4.5	4.0	4.3	4.2
4000	3.9	3.5	3.4	3.9	2.1	3.1
5000	4.6	2.9	2.0	2.9	3.2	1.7
Promedio	5.4	3.7	4.7	3.1	3.1	2.7

Tabla 3.6: C_{50} recintos Nivel 1

El promedio de las posiciones total nos da una claridad de la voz de **4.7 dB** para la sala de control y de **3.4 dB** para la sala de grabación, quedando por encima del valor mínimo esperado buscado para las salas, por lo que efectivamente se obtiene una buena claridad de la voz, lo cual es bueno para este tipo de recintos.

Definición, D_{50} :

Como se puede observar en la figura 3.6, la definición de la sala esta por encima del mínimo notablemente en todas las posiciones, por lo que sin necesidad de acondicionamiento acústico ya es positiva, muy por encima de 50% que es el valor mínimo buscado. Dado que es un recinto orientado al uso de la palabra, una buena definición es importante y no es espera que varíe notablemente con audiencia pues no son recintos con alta audiencia.

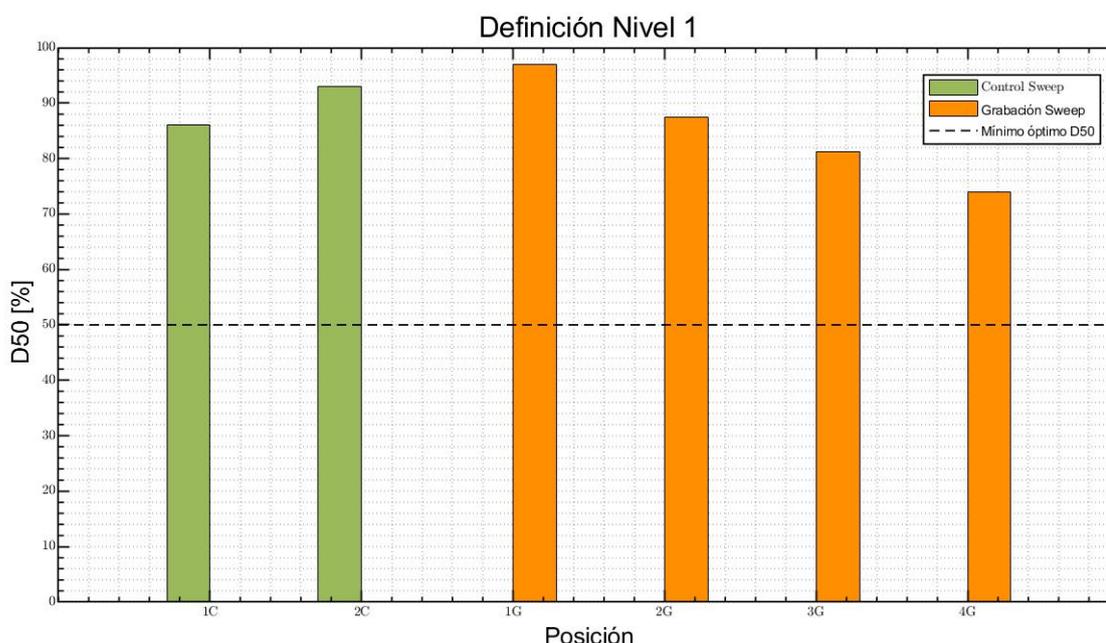


Figura 3.6: Definición recintos Nivel 1

En la tabla 3.7 se encuentran todos los valores de ésta, con las bandas frecuenciales más importantes utilizadas para el promediado resaltadas en naranja claro/amarillo. En este caso el promedio se realiza logarítmicamente, como con la presión sonora.

f [Hz]	1C [%]	2C [%]	1G [%]	2G [%]	3G [%]	4G [%]
63	33.2	29.7	43.3	39.8	20.9	29.4
125	76.8	85.5	96.4	75.4	73.3	43.2
250	69.8	91.8	85.5	86.6	68.6	57.0
500	82.8	80.4	83.4	75.2	79.4	64.0
1000	77.1	59.2	75.0	50.3	53.9	52.8
2000	79.6	72.4	73.9	71.7	72.7	72.3
4000	71.0	68.9	68.6	70.8	61.9	66.9
5000	74.3	66.3	61.3	66.2	67.6	59.5
Promedio	86.0	93.0	97.0	87.4	81.3	74.0

Tabla 3.7: D_{50} recintos Nivel 1

Finalmente en este nivel, para el parámetro definición se obtiene un promedio para la sala de control de **89.5 %** y para la de grabación de **84.9 %**, por lo que la definición de ambos recintos es más que aceptable.

Otros parámetros

Para finalizar las medidas y cálculos del nivel 1, se muestra a continuación una breve tabla con otros parámetros de interés de cara a la calidad acústica de la sala. En lo que a brillo se refiere, se encuentran salas brillantes, en el límite o sobrepasándolos para 3 de los 4 valores que hay, según el tipo de señal. La audiencia no parece ser muy relevante en este caso, sino más bien un leve acondicionamiento acústico. En cuanto a calidez, se ha escrito el rango esperado para una sala sinfónica ocupada y esto es solo un estudio de radio, cuyo volumen es dos órdenes de magnitud por debajo del mostrado en el nivel 3, por lo que los valores obtenidos se consideran buenos teniendo en cuenta la diferencia de recintos. Aun así, como requieren de acondicionamiento acústico, éste afectará con seguridad en dicho parámetro. Centrando la atención en la palabra muestran buenos valores de STI y RASTI, mostrando una inteligibilidad de la palabra mejorable, pero buena y un índice %Alcons dentro de lo esperado.

Parámetro	B_{Ratio}	Brillo	% ALCONS	STI	RASTI
Valor Esperado Teórico	$1.1 \leq X \leq 1.5$	≥ 0.9	$< 5\%$	> 0.6	> 0.6
Valor Medido/Calculado Control	0.9 (Rosa);1.0 (Sweep)	0.8 (Rosa);1.2 (Sweep)	3.1	0.7	0.7
Valor Medido/Calculado Grabación	1.0 (Rosa);1.1 (Sweep)	1.0 (Rosa);1.0 (Sweep)	3.2	0.7	0.7

Tabla 3.8: Otros parámetros de calidad Nivel 1

Como se aprecia en la tabla, aparecen por separado los valores de brillo y calidez según el tipo de fuente utilizada. Estos han sido calculados gracias a las ecuaciones 1.15 y 1.16 de la introducción teórica, mientras que el resto de parámetros han sido proporcionados por el software ARTA.

3.2. Nivel 2: Sala de conferencias en Alcoy

Repetiendo el proceso del análisis de modos para el cálculo de la densidad modal en las primeras bandas de octava y de la frecuencia máxima de teoría modal, se ha hecho uso de las ecuaciones 1.18 y 1.19, obteniendo los siguientes resultados:

- $D(63) = 1$; $D(125) = 2$ $D(250) = 7$; $D(500) = 28$; $D(1000) = 107$.
- F_{max} sin fondo = 89 Hz y F_{max} con fondo = 94 Hz.

Por tanto, a excepción de la banda de 63 Hz, no tendrían porque haber irregularidades no esperadas en el T_R y el resto de parámetros para ninguna de las dos situaciones de medición de éste nivel. En la tabla siguiente y las posteriores SF hace referencia a sin fondo y CF a con fondo (explicado en el capítulo 2) [17].

Medida de T_R :

A continuación se representa el tiempo de reverberación para éste nivel (Figura 3.7):

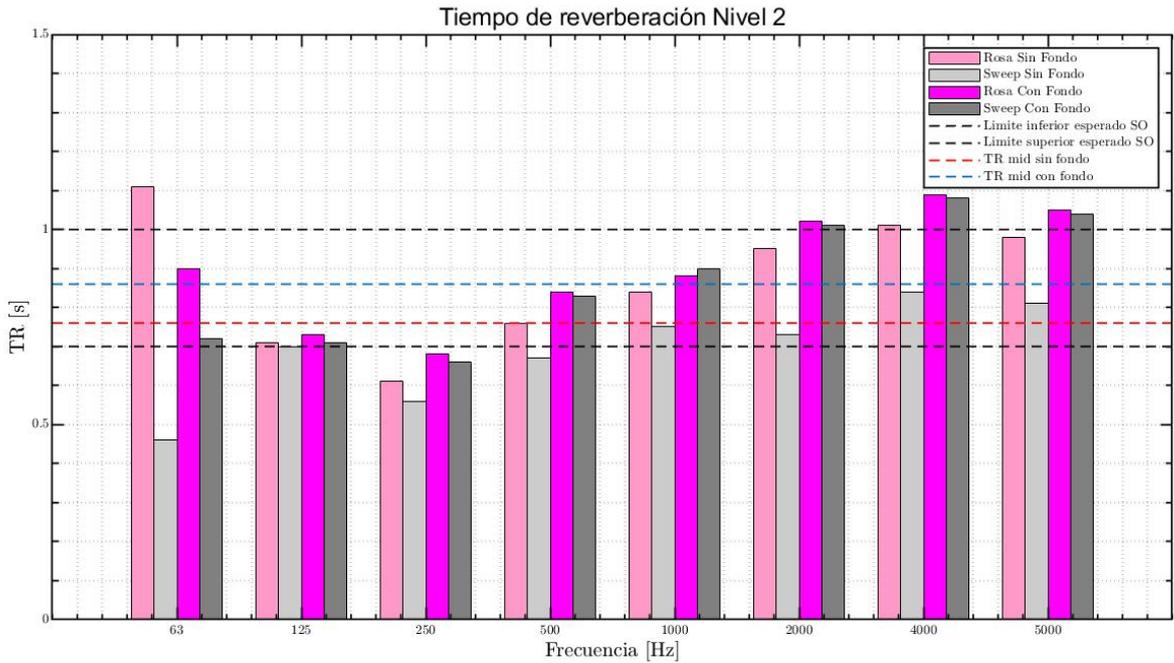


Figura 3.7: Tiempo de reverberación Nivel 2

Dado que las diferencias entre los dos días de medida (Sin fondo y Con fondo) son pocas en lo que a absorción y comportamiento de la sala se refiere, es de esperar que que el T_{Rmid} se cumpla para ambas situaciones, mejorando para el caso en el que la sala está 100 % acabada. No en todas las bandas de forma individual se cumple, aunque todas se encuentran cercanas al rango dado. En la tabla 3.9 se pueden observar todos los resultados para ambas señales en ambos días, así como la diferencia entre éstas nuevamente, siendo inferior para este caso en comparación con el nivel 1.

f [Hz]	Sonómetro SF [s]	ARTA SF [s]	Diferencia [s]	Sonómetro CF [s]	ARTA CF [s]	Diferencia [s]
63	1.1	0.5	0.6	0.9	0.7	0.2
125	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.0
250	0.6	0.6	0.0	0.7	0.7	0.0
500	0.7	0.7	0.0	0.8	0.8	0.0
1000	0.8	0.8	0.0	0.9	0.9	0.0
2000	1.0	0.8	0.2	1.0	1.0	0.0
4000	1.0	0.8	0.2	1.1	1.1	0.0
5000	1.0	0.8	0.2	1.1	1.0	0.1

Tabla 3.9: T_R Nivel 2

Sólo en el caso de la banda de 63 Hz parece haber una diferencia clara, la cual se ha comentado que podía verse afectada por la teoría modal. En el resto de bandas, especialmente para el caso CF, la diferencia es mínima. Dado que es un recinto ya construido en su totalidad, se ve como el resultado de la construcción ha sido el esperado en lo que a T_R se refiere.

Medida de T_{20} :

A continuación se representa en la figura 3.8 el tiempo de caída de 20 dB para el nivel 2:

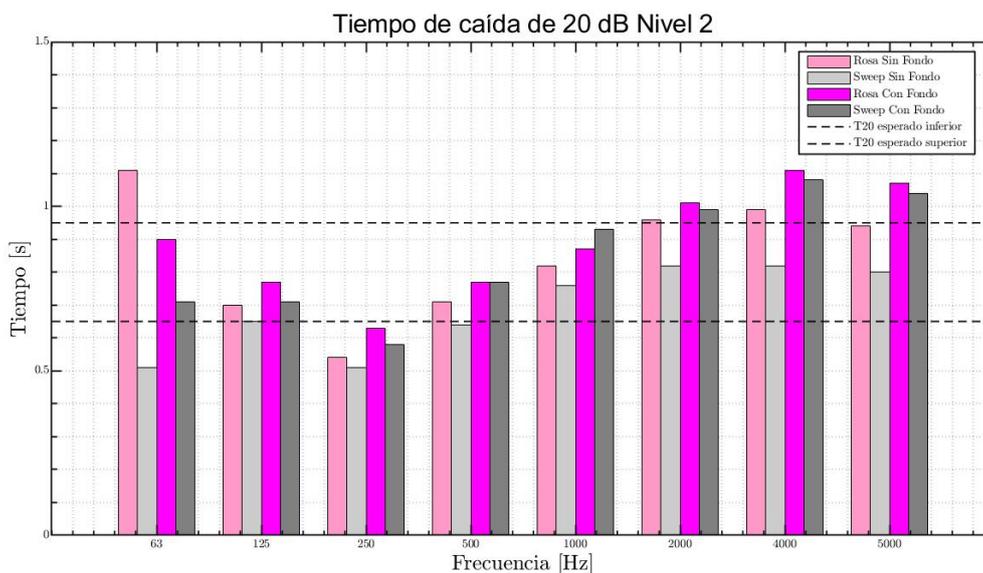


Figura 3.8: Tiempo de caída 20 dB Nivel 2

El comportamiento es similar al del T_R pues la diferencia en la caída es de 10 dB. Nuevamente los límites superior e inferior se han bajado por regla de tres pues no hay un valor esperado realmente para éste parámetro. En la tabla 3.10 se observan todos los valores que se han representado en la gráfica anterior para el T_{20} . Dado que el comportamiento es similar al del tiempo de reverberación, nuevamente la banda de 63 Hz supone una diferencia muy notable entre las medidas de ruido rosa y ruido sweep para el día sin fondo sobretodo, pero para el día con fondo sobretodo, las diferencias son mínimas en casi todas las bandas.

f [Hz]	Sonómetro SF [s]	ARTA SF [s]	Diferencia [s]	Sonómetro CF [s]	ARTA CF [s]	Diferencia [s]
63	1.1	0.5	0.6	0.9	0.7	0.2
125	0.7	0.8	0.1	0.8	0.7	0.1
250	0.5	0.5	0.0	0.6	0.6	0.0
500	0.7	0.6	0.1	0.8	0.8	0.0
1000	0.8	0.8	0.0	0.9	0.9	0.0
2000	1.0	0.8	0.2	1.0	1.0	0.0
4000	1.0	0.8	0.2	1.1	1.1	0.0
5000	0.9	0.8	0.1	1.1	1.0	0.1

Tabla 3.10: T_{20} Nivel 2

Medida de EDT:

Gráficamente los resultados del tiempo de decaimiento temprano para este nivel dos pueden observarse en la figura 3.9:

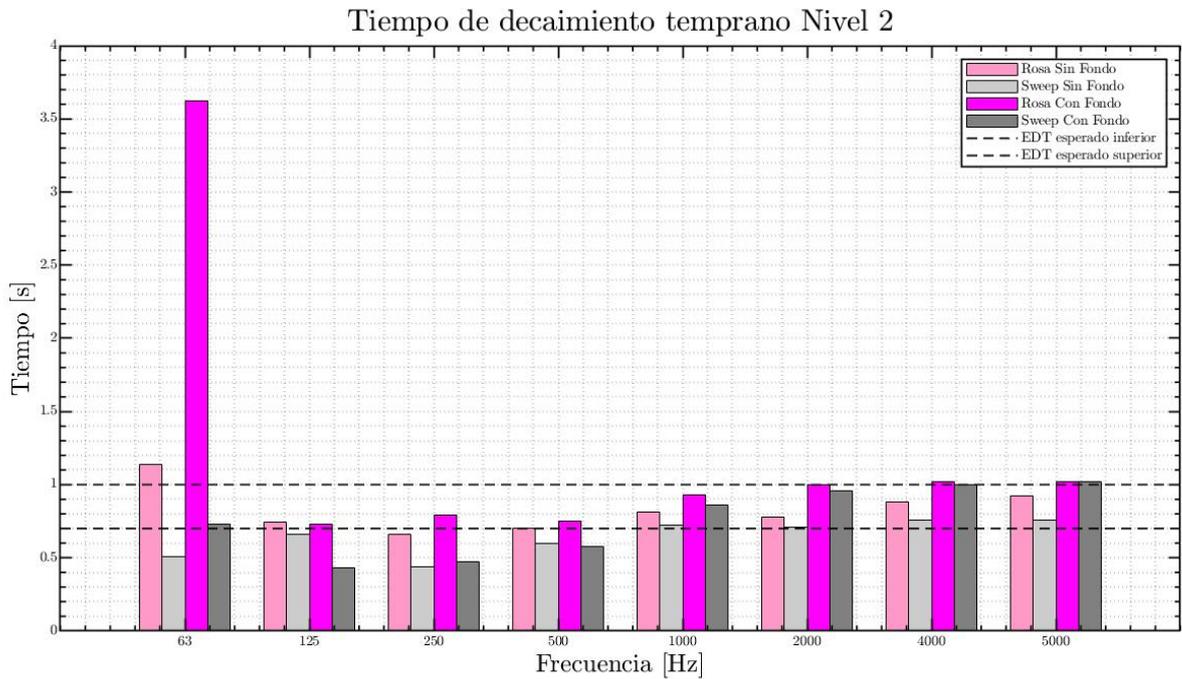


Figura 3.9: Tiempo de decaimiento temprano Nivel 2

Como el valor esperado de este parámetro es el mismo que el esperado para el tiempo de reverberación y, de hecho se espera que tengan los resultados valores iguales o un tanto inferiores al T_R , se aprecia como la figura 3.9 y la pasada figura 3.7 son casi iguales, exceptuando que en la banda de 63 hay una clara medida que sobrepasa al resto de una forma poco esperada en principio, pero que teniendo en cuenta los modos de la sala podría ser. El valor medio del EDT no ha sido representado dado que tampoco existen referencias más que se asemeje al T_R , pero por medida y no en promedio, por lo que así se observa en la figura 3.9. Como ha ocurrido con todos los resultados de parámetros previos, a continuación, en la tabla 3.11, se muestran todos los valores representados.

f [Hz]	Sonómetro SF [s]	ARTA SF [s]	Diferencia [s]	Sonómetro CF [s]	ARTA CF [s]	Diferencia [s]
63	1.1	0.5	0.6	3.6	0.7	2.9
125	0.7	0.7	0.0	0.7	0.4	0.3
250	0.7	0.4	0.3	0.8	0.8	0.0
500	0.7	0.6	0.1	0.8	0.6	0.2
1000	0.8	0.7	0.1	0.9	0.9	0.0
2000	0.8	0.7	0.1	1.0	1.0	0.01
4000	0.9	0.8	0.1	1.0	1.0	0.0
4000	0.9	0.8	0.2	1.0	1.0	0.0

Tabla 3.11: EDT Nivel 2

A continuación se exponen los parámetros que dejan de ser temporales, pasando a ser energéticos o de presión. Nuevamente las representaciones se realizarán por posiciones y no por bandas de octava.

Medida de C_{80} :

Para la medida de la Claridad Musical, C_{80} , se ha tenido en cuenta que el rango que hace que se considere que el parámetro esté en un intervalo óptimo es de entre -4 y 0 dB a sala vacía que es como se encuentra durante las medidas y entre -2 y 2 dB a sala ocupada y solo para ciertas frecuencias como en el nivel 1.

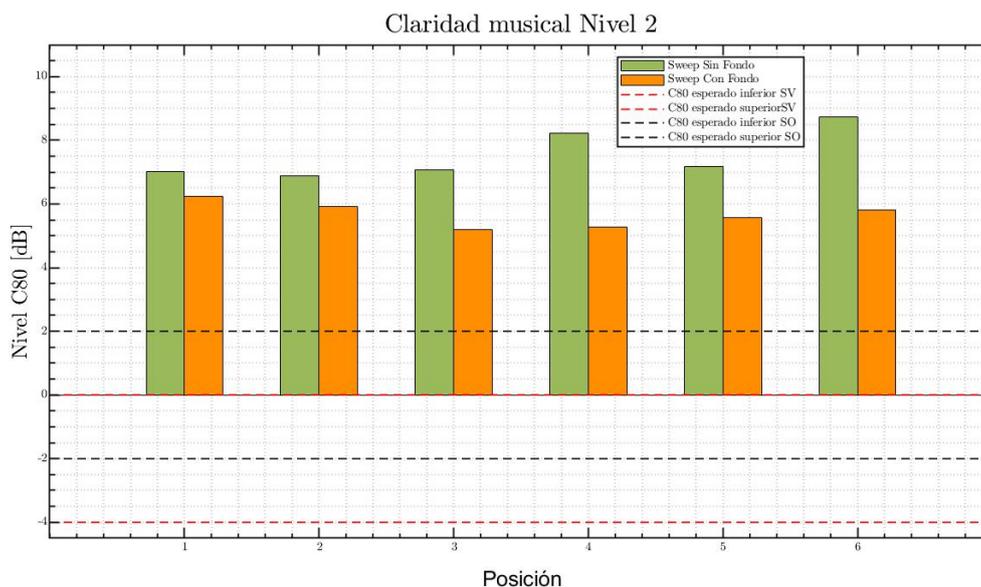


Figura 3.10: Claridad musical Nivel 2

Observando la gráfica de la figura 3.10 la claridad musical sigue sin ser buena aun poniendo la sala finalizada y en condiciones óptimas. Ciertamente es que la diferencia entre ambos días es apreciable, haciendo que el descubrir las butacas y colocar la puerta y el cristal haga que la claridad se acerque más a su valor esperado, que sería el 0, pero todavía queda muy lejana. En este caso el estar ocupada por gente si que podría hacer un cambio significativo en estos parámetros debido al número de ocupantes que puede albergar.

Posición	1	2	3	4	5	6
Sin Fondo [dB]	7.0	6.9	7.1	8.2	7.2	8.7
Con fondo [dB]	6.2	5.9	5.2	5.3	5.6	5.8

Tabla 3.12: C_{80} Nivel 2

En la tabla anterior (tabla 3.12) se indican solo los valores promediados directamente (es decir, los representados en la figura 3.10) por el crecimiento en el número de posiciones, pues serían 6 posiciones por dos días diferentes, para la claridad musical. Los promedios han sido obtenidos por las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz y las mismas ecuaciones del nivel 1. En este caso el valor promediado de la claridad musical para toda la sala sin fondo es de **7.5 dB** y para la sala con fondo es de **5.7 dB**. Aunque sigue sin ser el esperado, sí que mejora con la finalización de la obra y se mantiene muy homogénea en toda la sala.

Medida de C_{50} :

A la hora de observar los resultados de la medida de la claridad de la voz se tiene en cuenta que el valor recomendable de un $C_{50} > 2$ dB a sala ocupada. En la figura 3.11 se observa el empeoramiento de la claridad de la voz en la sala al terminar de poner el fondo, lo cual supone un problema dado que al ser una sala de conferencias, ésta debería ser lo mejor posible. Ciertamente es aun empeorando, es la esperada en 4 de 6 posiciones, lo cual supone que seguirá habiendo una buena claridad de la voz teniendo en cuenta que el mínimo esperado es para sala ocupada, y los resultados son a sala vacía.

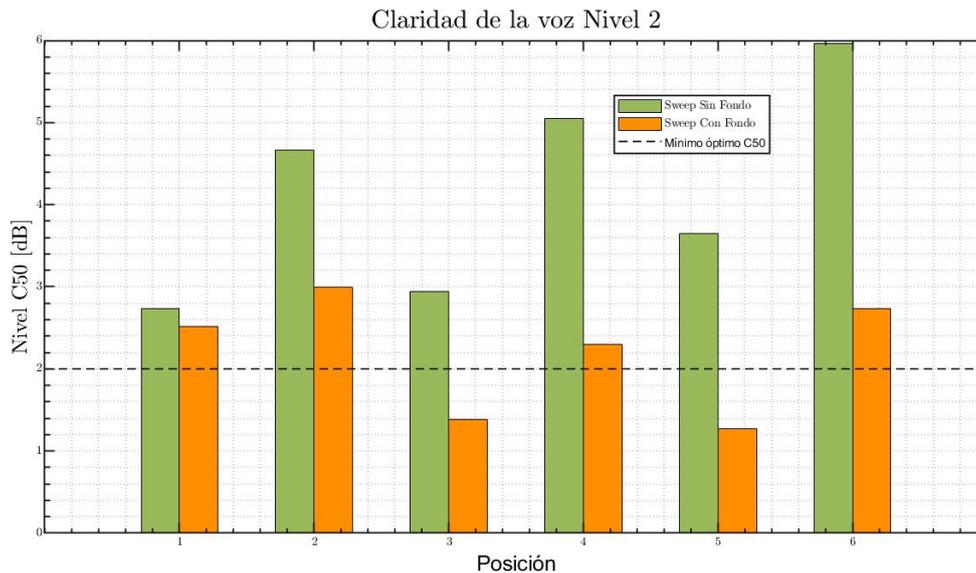


Figura 3.11: Claridad de la voz Nivel 2

En la tabla 3.13 se recogen todos los valores promediados que han sido representados gráficamente en la figura 3.11. Mencionar que la claridad de la voz mejora cuando la sala se ocupa, según Carrión, por lo que dada la cercanía de los resultados al mínimo esperado para sala ocupada, es de esperar que si se hicieran mediciones a sala ocupada, los valores sobrepasarán el mínimo.

Posición	1	2	3	4	5	6
Sin Fondo [dB]	2.6	4.7	2.9	5.1	3.7	6.0
Con fondo [dB]	2.5	3.0	1.4	2.3	1.3	2.7

Tabla 3.13: C_{50} Nivel 2

Para la tabla anterior se han calculado también los promedios totales de la sala para la claridad de la voz, obteniendo sin fondo una claridad de la voz de **5.7 dB** y con fondo una claridad de la voz de **2.2 dB**. Aunque a obra finalizada sigue estando por encima del buscado, se aprecia como los cambios de materiales y, por tanto, de los coeficientes de absorción, influyen en los cambios en la claridad que en este caso supone un empeoramiento de la claridad de la voz.

Medida de D_{50} :

Para el caso de la definición, el terminar la obra supone un empeoramiento o mejora aleatorio según la banda, pero manteniéndose en un muy buen nivel. En la figura 3.12 se aprecian los resultados. Hay que tener en cuenta que al ocupar la sala, la definición mejora en una pequeña cantidad, por lo que nada que añadir sobre ésta, dado que es buena siempre.

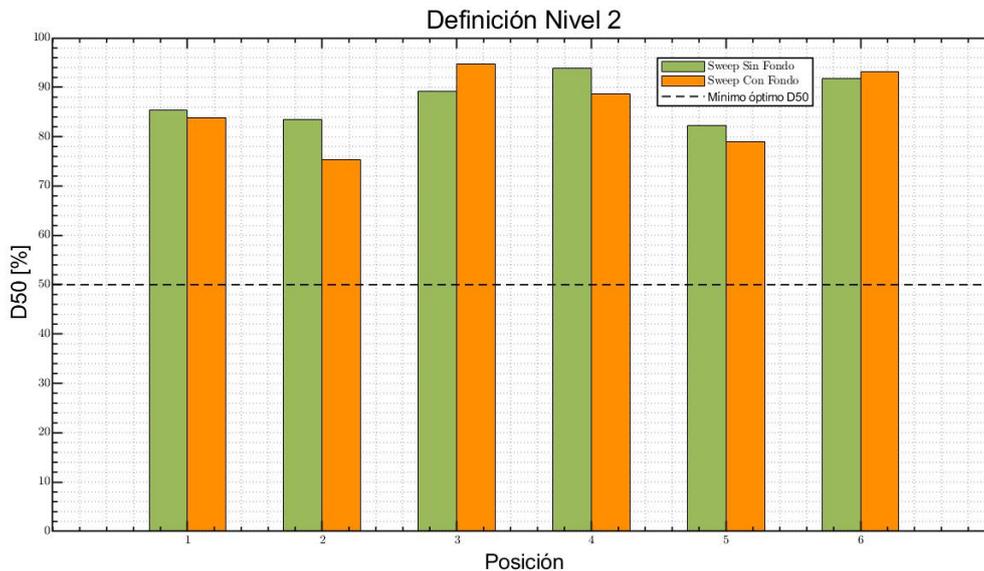


Figura 3.12: Definición Nivel 2

En la tabla 3.14 se recogen los valores que se observan en la gráfica 3.12:

Posición	1	2	3	4	5	6
Sin Fondo [%]	85.3	83.5	89.2	93.8	82.3	91.7
Con fondo [%]	83.9	75.4	94.7	88.2	79.1	93.2

Tabla 3.14: D_{50} Nivel 2

Como promedio para toda la sala se obtienen finalmente una definición de **87.6 %** para cuando la obra estaba sin finalizar, es decir, sin fondo, y de **85.8 %** a obra finalizada.

Otros parámetros:

Para terminar éste nivel, se muestran a continuación otros parámetros de interés obtenidos o bien a partir del tiempo de reverberación, o bien medidos con ARTA y relacionados con la inteligibilidad de la palabra, lo cual es muy importante en este tipo de recintos. Para esta sala se observa cómo los parámetros referidos a la percepción del habla como STI/RASTI/ALCONS están dentro de lo esperado por lo que habla una buena percepción del habla de y las consonantes, empeorando éste último un tanto con la retirada del plástico de las butacas. Esto tiene sentido de cara a que al quitarle el plástico a las butacas, la energía de los primeros milisegundos disminuye pues la absorción ha crecido en esta parte del recinto. Como ésta energía disminuye, dicho parámetro también disminuye. Se observa que la sala tiene un brillo acorde al mínimo esperado, pero superior a 1, por lo que a sala vacía, la sala es demasiado viva o brillante. Hay que tener en cuenta que la colocación de audiencia, lo que en este caso tendrá notablemente más relevancia que en el nivel 1, podría generar una disminución de éste hasta encontrarse dentro de lo esperado a sala ocupada.

Parámetro	B_{Ratio}	Brillo	% ALCONS	STI	RASTI
Valor Esperado Teórico	$1.1 \leq X \leq 1.3$	≥ 0.9	$< 5\%$	> 0.6	> 0.6
Valor Medido/calculado Sin fondo	0.8 (rosa); 0.9 (sweep)	1.2 (rosa); 1.2 (sweep)	3.2	0.7	0.7
Valor Medido/calculado Con fondo	0.8 (rosa); 0.8 (sweep)	1.2(rosa);1.2(sweep)	4.3	0.7	0.7

Tabla 3.15: Otros parámetros de calidad Nivel 2

El intervalo seleccionado para la calidez ha sido acorde con lo explicado en el punto 1.2.3 de la introducción teórica, a pesar de que éste tipo de recintos no están destinados a música sinfónica ni grandes audiencias. Es por ello que a pesar de estar levemente fuera del rango esperado a sala ocupada, se espera que al ocuparse quede dentro del rango teórico.

3.3. Nivel 3: Auditorio en Beniarbeig

Se han realizado medidas del tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos en el auditorio de Beniarbeig a obra finalizada, con la sala vacía, sin y con butacas, lo que permite observar las diferencias en los resultados de los parámetros medidos [18]. La metodología utilizada en las mediciones ha sido explicada en el capítulo 2. El único apunte a dar antes de explicar las medidas realizadas es que a pesar de que las mediciones se hicieron a obra finalizada, seguían habiendo restos de escombros y alguna pared si estar finalizada para el caso de sin butacas, por lo que las condiciones de medida podrían haber sido mejores, aunque no se piensa que puedan afectar verdaderamente a los resultados de este trabajo, donde lo que se busca es el cambio con la colocación de las butacas. Se muestran a continuación los siguientes resultados sobre densidad de modos para las 5 primeras bandas de octava y el valor máximo a partir del cual la teoría modal puede dejar de tenerse en cuenta:

- $D(63) = 234$; $D(125) = 1895$; $D(250) = 1515$; $D(500) = 1211$; $D(1000) = 9694$
- F_{max} sin butacas = 61 Hz; F_{max} con butacas = 47 Hz

Como era de esperar para este tamaño de sala, como mucho habría que tener en cuenta la banda de 63 Hz, y ni siquiera es excesivamente relevante con butacas, por lo que este resultado habrá que tenerlo en cuenta en los obtenidos a lo largo de este nivel.

Medida de T_R :

A continuación se muestra en la figura 3.13 los valores de tiempo de reverberación según el tipo de señal y para los dos días de medida, es decir, para las dos condiciones de medida:

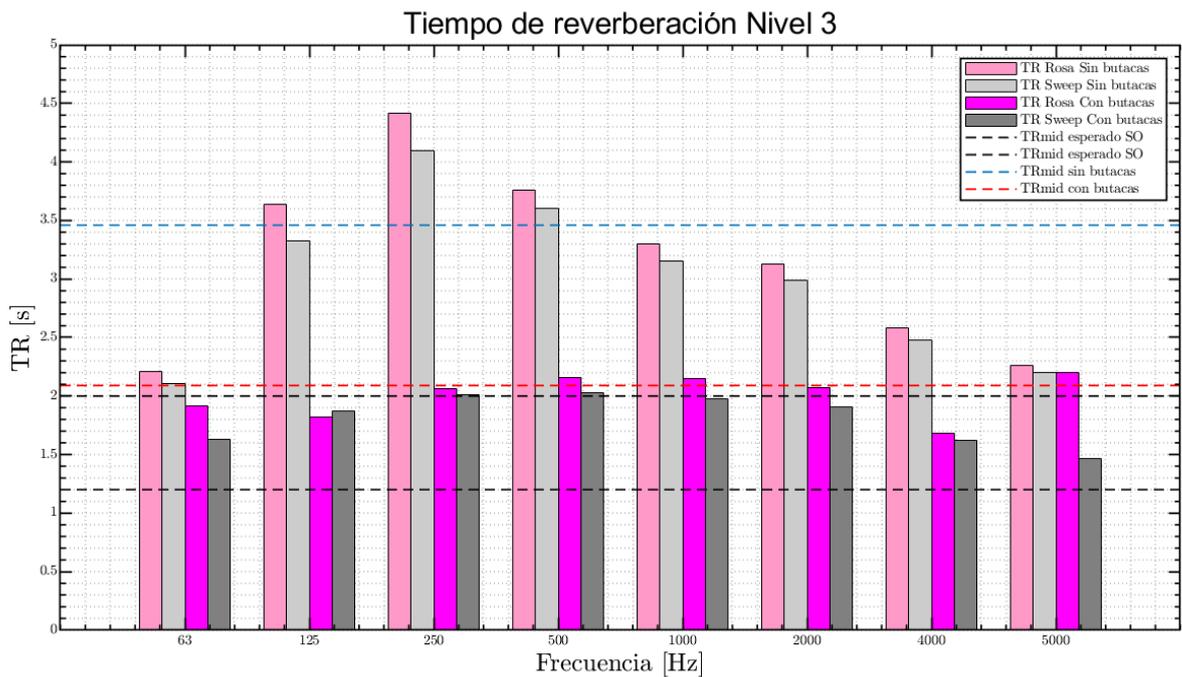


Figura 3.13: Tiempo de reverberación Nivel 3

En la figura 3.13 se representa el tiempo de reverberación medido para el nivel 3. Se aprecia una clara mejora del T_{Rmid} cuando se colocan las butacas, consiguiendo que este se encuentre casi en el

intervalo esperado. Comentar que a excepción de las butacas y de una pared que sí era de material perforado, lo cual afecta a toda la absorción y reflexión del sonido [19,20], los materiales eran bastante homogéneos. En la tabla siguiente y las posteriores SB hace referencia a sin butacas y CB con butacas.

f [Hz]	Sonómetro SB [s]	ARTA SB [s]	Diferencia [s]	Sonómetro CB [s]	ARTA CB [s]	Diferencia [s]
63	2.2	2.1	0.1	1.9	1.6	0.3
125	3.6	3.3	0.3	1.8	1.9	0.1
250	4.4	4.1	0.3	2.1	2.0	0.1
500	3.8	3.6	0.2	2.2	2.0	0.2
1000	3.3	3.2	0.1	2.2	2	0.2
2000	3.1	3	0.1	2.1	1.9	0.2
4000	2.6	2.5	0.1	1.7	1.6	0.1
5000	2.3	2.2	0.1	2.2	1.5	0.7

Tabla 3.16: T_R Nivel 3

Para este recinto las diferencias entre el uso de una señal o de otra son menores a las obtenidas en el estudio de radio. Debido a las dimensiones y al reparto de la energía en el espacio, se habla de campo no difuso en este caso.

Medida T_{20} :

La gráfica siguiente muestra los resultados obtenidos para el T_{20} :

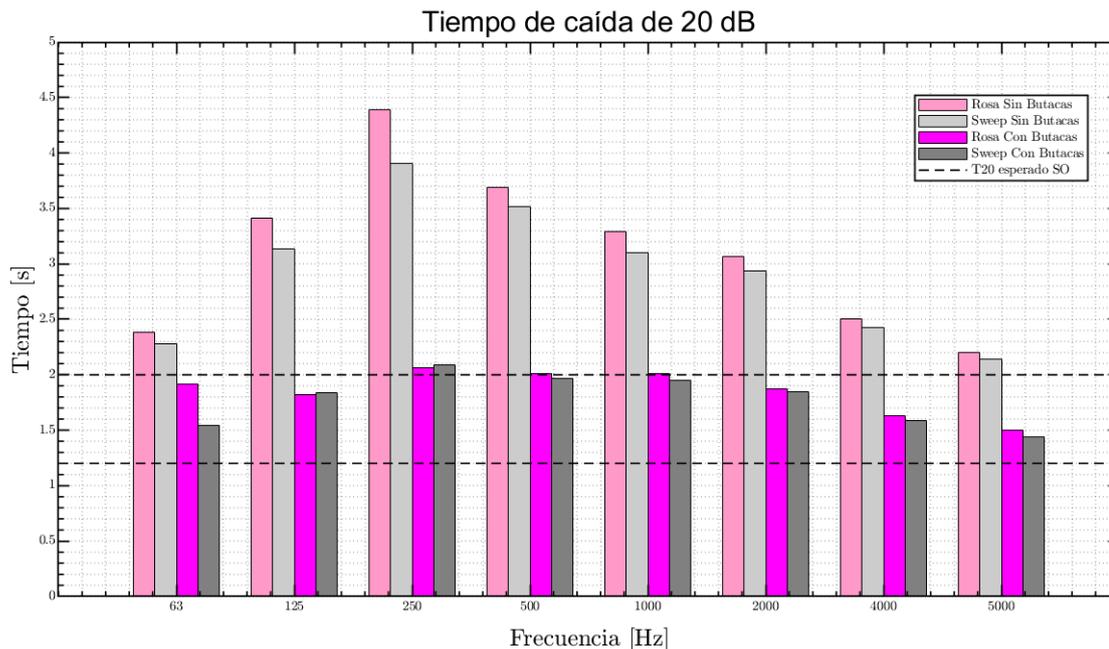


Figura 3.14: Tiempo de caída de 20 dB Nivel 3

Dejando para el T_{20} un intervalo esperado igual al del T_R , si que entran los valores en el intervalo esperado debido a que son tiempos menores. En la tabla 3.17 aparecen todos los valores de este gráfico.

f [Hz]	Sonómetro SB [s]	ARTA SB [s]	Diferencia [s]	Sonómetro CB [s]	ARTA CB [s]	Diferencia [s]
63	2.4	2.3	0.1	1.9	1.5	0.4
125	3.4	3.1	0.3	1.8	1.8	0.0
250	4.4	3.9	0.5	2.1	2.1	0.0
500	3.7	3.5	0.2	2.0	2.0	0.0
1000	3.3	3.1	0.2	2.0	2.0	0.0
2000	3.1	2.9	0.2	1.9	1.9	0.0
4000	2.5	2.4	0.1	1.6	1.6	0.0
5000	2.2	2.1	0.1	1.5	1.4	0.1

Tabla 3.17: T_{20} Nivel 3

Medida de EDT:

Como se mencionó en la introducción, el valor de EDT esperado se encuentra entre el T_{Rmid} y el 90% de este según Arau-Puchades. Se puede considerar viendo la figura 3.15 que en prácticamente ningún momento se alcanza, a pesar de haber hecho el intervalo con el T_{Rmid} de sala con butacas, el EDT esperado a sala ocupada. De hecho, es bajo incluso el EDT pues cuando estuviera ocupada la sala, todavía bajaría más, haciendo que solo a bajas frecuencias pudiera estar en el intervalo.

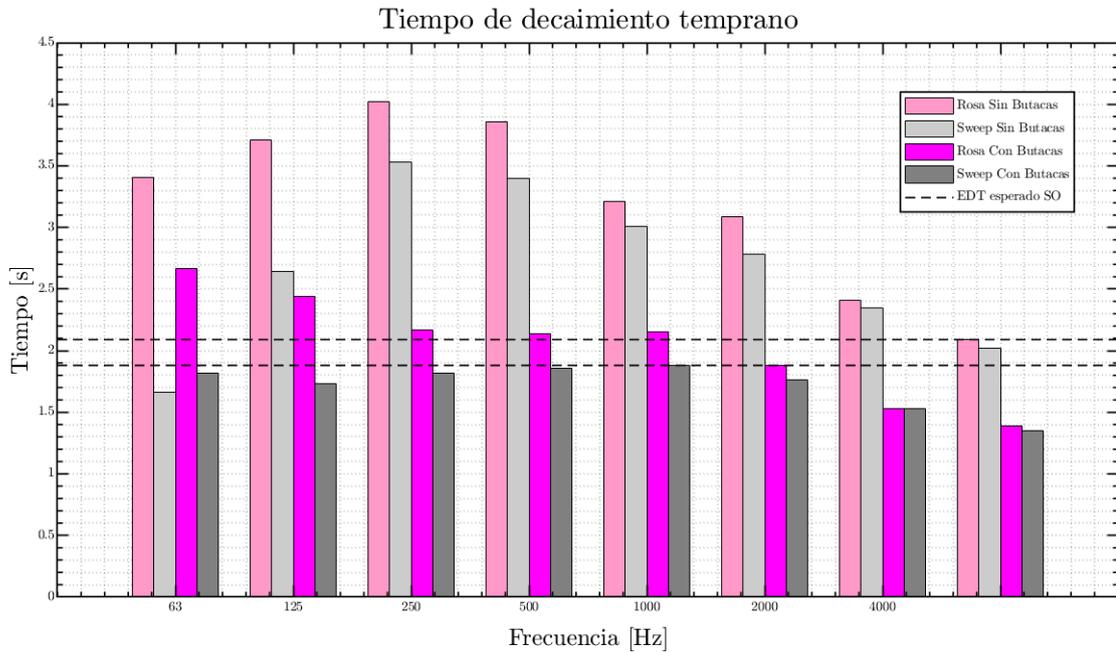


Figura 3.15: Tiempo de decaimiento temprano Nivel 3

En la tabla 3.18 se tienen los valores numéricos representados en el gráfico anterior junto con la diferencia entre ambas señales. Se observan mayores diferencias a baja frecuencia que a alta frecuencia. Esto puede ser debido a los tipos de señal utilizadas.

f [Hz]	Sonómetro SB [s]	ARTA SB [s]	Diferencia [s]	Sonómetro CB [s]	ARTA CB [s]	Diferencia [s]
63	3.4	1.7	1.7	2.7	1.8	0.8
125	3.7	2.6	1.1	2.4	1.7	0.7
250	4.0	3.5	0.5	2.2	1.8	0.4
500	3.9	3.4	0.5	2.1	1.9	0.2
1000	3.2	3.0	0.2	2.2	1.9	0.3
2000	3.1	2.8	0.3	1.9	1.8	0.1
4000	2.4	2.4	0.0	1.5	1.5	0
5000	2.1	2.0	0.1	1.4	1.4	0.0

Tabla 3.18: EDT Nivel 3

Medida de C_{80} :

Para la medida de la Claridad Musical, C_{80} , se ha tenido en cuenta que el rango que hace que se considere que el parámetro esté en un intervalo óptimo es de entre -4 y 0 dB para sala vacía y -2 y 2 dB para sala ocupada. Los dos valores medidos son a sala vacía, pero se puede apreciar la mejora con el colocamiento de las butacas en cuanto a aproximarse más al esperado para sala ocupada. Si se compararan solamente con el intervalo a sala vacía, la claridad musical parece mantenerse pero de diferente forma con las butacas. Dado que la ocupación de la audiencia aumenta éste parámetro, se puede apreciar cómo en las posiciones mas lejanas mejoraría dentro del rango esperado a sala ocupada y sólo en 2 posiciones cercanas podría salirse levemente del rango esperado (-2 y 2 dB).

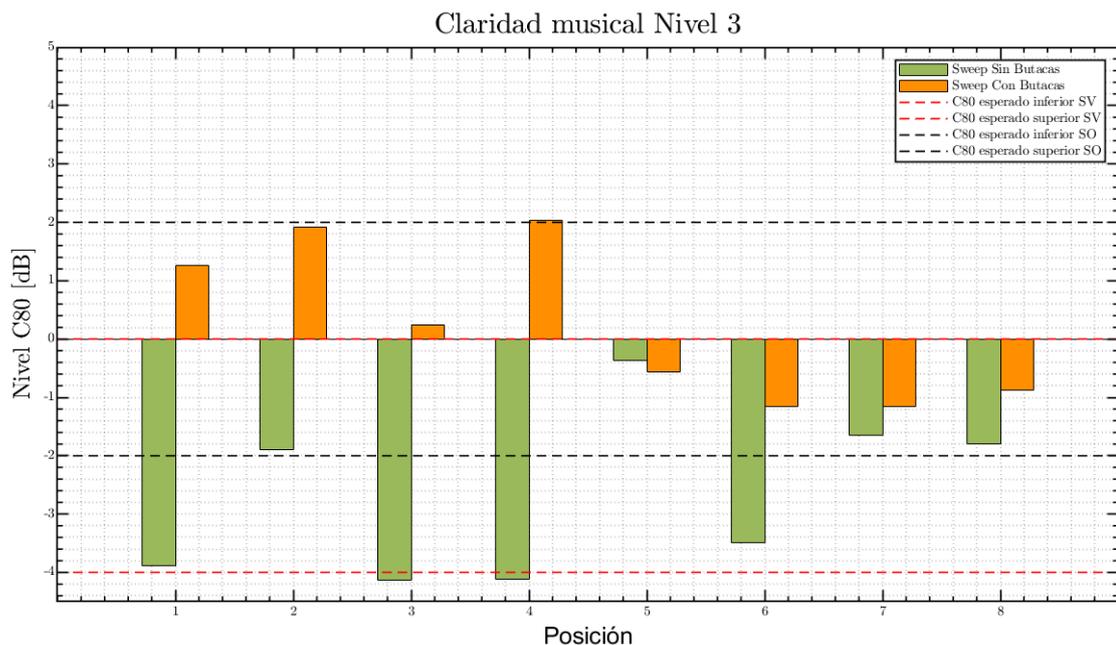


Figura 3.16: Claridad de la voz Nivel 3

Los valores representados para las 8 posiciones de señal sweep se encuentran en la tabla 3.19. Al margen de ellos, se explicó en el capítulo 2 que para este recinto realmente se hicieron otra dos posiciones 9 y 10 para parámetros como éste al colocar las butacas. Dado que no existe comparativa, y la proximidad con otras posiciones cercanas, no se han querido colocar en la tabla.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8
Sin Butacas [dB]	-3.9	-1.9	-4.1	-4.1	-0.4	-3.5	-1.7	-1.8
Con Butacas [dB]	1.3	1.9	0.2	2.0	-0.6	-1.2	-1.2	-0.9

Tabla 3.19: C_{80} Nivel 3

De los valores de la tabla anterior se extrae como valor de la claridad musical total de la sala **-2.7 dB** sin butacas y de **0.7 dB** con butacas. Aparentemente la claridad musical total de la sala empeora con la colocación de las butacas pues se encuentra fuera del rango para sala vacía.

Medida de C_{50} :

A la hora de observar los resultados de la medida de la claridad de la voz se tiene en cuenta que el valor recomendable de un $C_{50} > 2$ dB a sala ocupada :

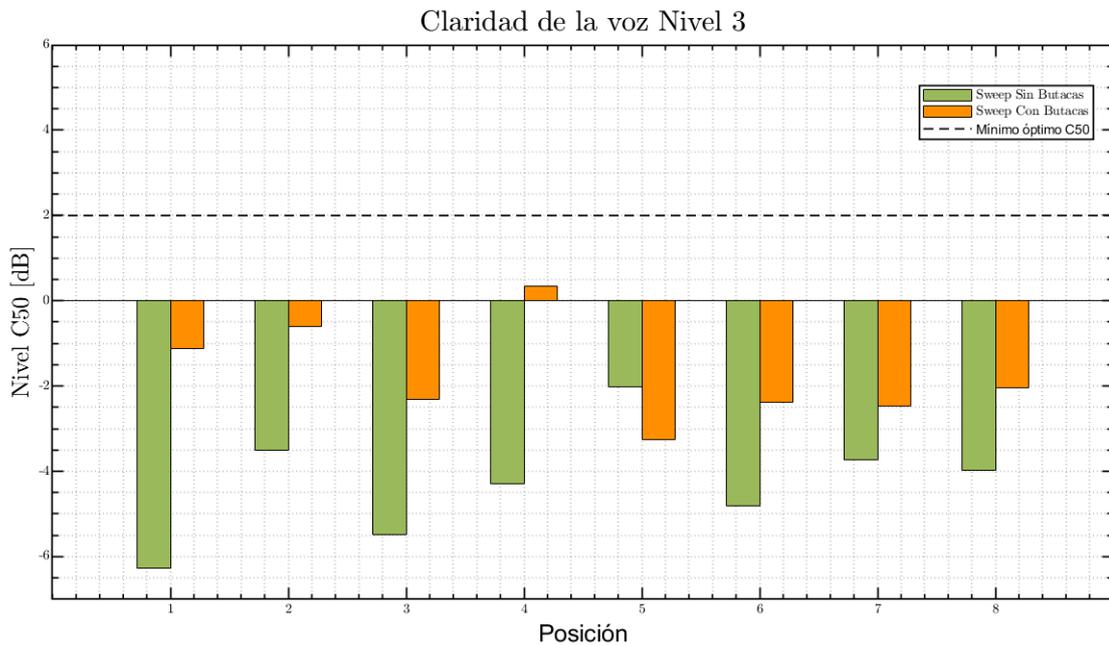


Figura 3.17: Claridad de la voz Nivel 3

La claridad de la voz mejora notablemente con el uso de butacas en prácticamente todo el espacio, exceptuando la posición 5, haciendo el recinto más apto en general que sin las butacas, pero todavía lejos de ser bueno esperado, por lo que habría que realizar las mediciones con la sala ocupada para comprobar si termina de crecer hasta el mínimo esperado. Los valores mostrados en la tabla 3.20 son los obtenidos tras promediar en cada posición con la ecuación 1.13.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8
Sin Butacas [dB]	-6.3	-3.5	-5.5	-4.3	-2	-4.8	-3.7	-4.0
Con Butacas [dB]	-1.1	-0.6	-2.3	0.4	-3.3	-2.4	-2.5	-2.05

Tabla 3.20: C_{50} Nivel 3

De los valores de la tabla 3.20 se extrae como valor de la claridad de la voz total de la sala **-4.3 dB** sin butacas y de **-1.1 dB** con butacas. La claridad de la voz total de la sala mejora notablemente con la colocación de las butacas aunque aún dista del valor esperado, el cual se podría alcanzar teniendo en cuenta la falta de público, que en este caso sería notable dado el número de asientos de audiencia.

Medida de D_{50} :

A continuación se observa en la figura 3.18 los resultados gráficos de la definición. Claramente ésta mejora con las butacas, aunque es peor conforme nos alejamos del escenario. Sobrepasa el valor del 50% esperado por poco, e incluso en las posiciones más lejanas ni lo alcanza (posiciones 7 y 8) aun con las butacas. Hay que tener en cuenta la falta de audiencia, que dado que afecta crecientemente, haría que la definición estuviera en toda la sala por encima del mínimo esperado.

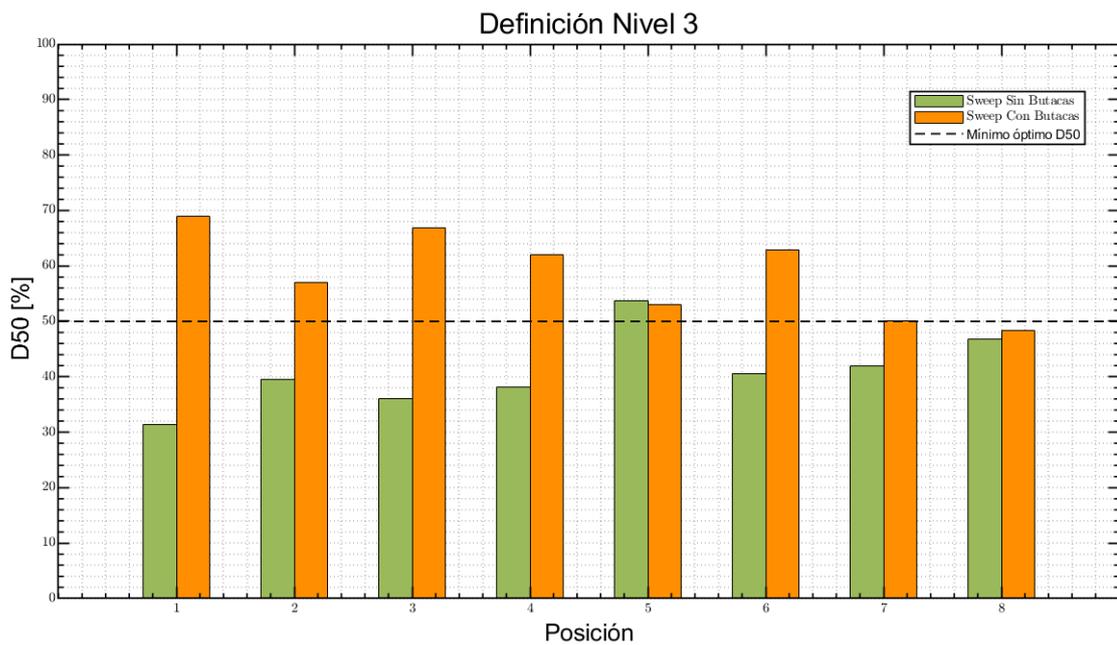


Figura 3.18: Definición Nivel 3

En la tabla 3.21 se muestran los valores numéricos de la figura 3.18:

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8
Sin Butacas [%]	31.4	39.5	36.2	38.1	53.7	40.5	42.0	46.8
Con Butacas [%]	69.0	57.1	66.9	62.0	53.0	62.9	50.1	48.4

Tabla 3.21: D_{50} Nivel 3

De la tabla anterior se extrae una definición promediada para toda la sala que tiene para el caso sin butacas un valor de **41.0%**, mejorando a un valor de **60.8%** con la colocación de las butacas, mostrando una buena definición. Éste parámetro mejora con la absorción de dichos elementos.

Otros parámetros:

En la tabla 3.22 aparecen los valores de otros parámetros que, para el tipo de sala en el que nos encontramos, pesan más la calidez o el brillo, y no tanto los referidos a palabra, pues se busca un objetivo más musical. El intervalo escrito tanto para brillo como para calidez ha sido seleccionado en base a los intervalos propuestos por Beranek, siendo el más óptimo el escrito para calidez de un T_{Rmid} cercano a 1.8 s a sala ocupada para salas de éste tipo.

Parámetro	B_{Ratio}	Brillo	% ALCONS	STI	RASTI
Valor Esperado Teórico	$1.1 \leq X \leq 1.5$	≥ 0.9	$< 5\%$	> 0.6	> 0.7
Valor Medido/calculado Sin butacas	1.1	0.8	20.6	0.4	0.4
Valor Medido/calculado Con butacas	1.0	0.9	10.8	0.5	0.5

Tabla 3.22: Otros parámetros de calidad Nivel 3

Para la sala en cuestión, los parámetros obtenidos son un brillo aproximadamente bueno, pero no suficiente, aunque hay que tener en cuenta que el valor indicado teórico es para una sala totalmente ocupada, por lo que la ocupación de la audiencia podría terminar de mejorarlo y un bass ratio bueno dado que se encuentra cercano al rango esperado sin estar ocupada la sala todavía, lo que en este caso es importante, por lo que la calidez de la sala es adecuada. Dado que el T_{Rmid} es de 2.09 s con las butacas, se ha elegido el rango correspondiente para la proporción de graves correspondiente a un T_{Rmid} de 1.8 s por ser el valor más próximo de los 2 explicados en el punto 1.2.3. Los parámetros que hacen referencia a palabra son muy mejorables en cuanto a percepción de consonantes, y algo mejorables en lo que inteligibilidad de la palabra se refiere.

3.4. Estudio teórico-empírico

En esta sección se ha realizado un estudio teórico basado en una extensión o variación sobre la fórmula de Eyring (ecuación 1.2), pero extendiéndola para campo no difuso. De todas las explicadas en la introducción teórica, se ha elegido esta por no dar error a causa del coeficiente de absorción como ocurría con Sabine, y por ser omnidireccional, o simplemente no marcar ninguna dirección privilegiada como ocurría con Fitzroy o Arau-Puchades. El estudio parte de tres premisas aunque dos de ellas van unidas: no pensar en la forma de la sala de forma condicionante para la fórmula y tener en cuenta la posición de la fuente por una parte, y diferenciar entre superficies de primera reflexión y posteriores. El motivo de introducir este paso de pensar en la posición de la fuente es porque se ha considerado que es importante el cómo afecta al resultado, al igual que afectaría la posición del oyente, pero esta última no se ha tenido en cuenta por complejidad excesiva en el cálculo. Diferenciar entre primeras y segundas superficies de reflexión afectaría al camino libre medio de algunos rayos sonoros, esperando que sea mayor para las posteriores a primera reflexión. A pesar de que el tiempo se mide para un campo sonoro ya distribuido, el cómo se distribuya dependerá de las condiciones iniciales y de la evolución del sonido en el recinto, es decir, del camino que recorra cada frente de onda o rayo. En primer lugar se recuerda la ecuación 1.2 por sencillez en la lectura del trabajo (ecuación de Eyring):

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \alpha_{Ey} + 4mV}, \quad \text{con } \alpha_{Ey} = -\ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (3.1)$$

Siguiendo con la explicación propuesta por Eyring, se tiene en cuenta el término logarítmico y así evitar conflictos en función del valor del coeficiente de absorción. Más allá de ello, se pensó en sustituir dentro del coeficiente de absorción medio, los términos según la superficie sobre la que incidía el sonido y la posición de las superficies respecto a la fuente, es decir, su ángulo sólido, y así tener en cuenta el número total de superficies posibles del recinto y la distancia de éstas a la fuente, quedando la siguiente expresión:

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot (\sum_j (\Omega_j * \ln(1 - (\frac{1}{S_j} \cdot \sum_i (S_i \cdot \alpha_i)))) + 4mV} \quad (3.2)$$

Por otro lado, se mencionó el hecho de diferenciar entre superficies de primera reflexión y superficies de segundas o posteriores reflexiones, pues aquellas a las que el ángulo sólido no abarque en primera instancia, serán de segunda reflexión como mínimo. De este modo, se le añadirá un término que hará referencia a estas superficies posteriores a la primera reflexión introduciendo una función seno, donde el ángulo es el que forma la superficie con respecto a un plano paralelo al suelo. Como se observa en la ecuación 3.3, se añade como término suma para quitarlo en caso de no haber superficies que no sean de primera reflexión y así obtener una ecuación que tenga en cuenta únicamente el ángulo sólido:

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot (\sum_j (\Omega_j * \ln(1 - (\frac{1}{S_j} \cdot \sum_i (S_i \cdot \alpha_i)))) + \sum \Omega_i \cdot \text{sen}(\theta_i) + 4mV} \quad (3.3)$$

Ese ángulo añadido no es con respecto a la fuente, pues la fuente es omnidireccional, sino con respecto a la horizontal, pues se parte de la base de que no es alcanzable por la fuente de forma directa.

Toda ésta explicación se ha realizado teniendo en cuenta de que se forma un campo sonoro en un recinto cerrado, pero se ha querido intentar diferenciar estos dos tipos de superficies pues el cómo se reparta ese campo dependerá también de cómo interactúen las ondas sonoras y, por tanto, de donde provienen. Finalmente y, tras haber realizado diferentes pruebas, se procedió a cambiar el coeficiente 0.161 por 3.2, obteniendo la ecuación 3.4. Se recuerda que ésta fórmula es empírica, no teórica. De hecho, dados los resultados del punto 3.5, se procederá a buscar su demostración teórica pensando en que se obtenga un resultado un tanto modificado pues no es correcta para todos los espacios estudiados, aunque esto ya escapa a los objetivos del presente trabajo.

$$T_R = \frac{3,2 \cdot V}{-S \cdot (\sum_j (\Omega_j * \ln(1 - (\frac{1}{S_j} \cdot \sum_i (S_i \cdot \alpha_i)))) + \sum \Omega_i \cdot \text{sen}(\theta_i) + 4mV} \quad (3.4)$$

De la ecuación 3.4 matizar para evitar confusiones que S hace referencia a la superficie total del recinto, suma de todas las superficies. El ángulo sólido Ω es el ángulo sólido con respecto a una superficie total (una pared, o el suelo) y las superficies que existen dentro del logaritmo neperiano son la que tiene subíndice j, la respectiva a la superficie total que abarca el ángulo sólido, mientras que la que tiene subíndice i hace referencia a superficies menores dentro de la anterior, por ejemplo, una ventana en una pared.

A continuación se muestran en el punto 3.5 los resultados que comparan los métodos clásicos con el propuesto en éste punto para ver cuales se acercan en cada caso más a los obtenidos de las medidas. Mencionar ya que del método propuesto por el autor, el cual se representará por Joaquín en los gráficos siguientes, solamente se ha hecho uso de la parte angular ($\text{sen}(\theta)$) para una de las superficies del auditorio pues era la única que se ha considerado que no recibía el sonido sin reflexiones previas.

3.5. Resultados

Para finalizar la parte de cálculo y central de este trabajo, se utilizará esta sección con el fin de comparar los resultados medidos, los clásicos y comparar con los teórico-empíricos propuestos por Jose Joaquín Pérez Maciá. Los autores clásicos seleccionados han sido Sabine, Eyring, Fitzroy y Arau. Los dos primeros por su contrastación constante en la literatura relacionada con temas como los de éste trabajo y, ser además de campo difuso. Mientras que a Fitzroy y Arau se les ha seleccionado por ser de campo no difuso y también altamente contrastados en la literatura. En concreto Arau también por tener un alto nivel de aceptación y ser su fórmula un referente en campo no difuso. A continuación las 6 tablas correspondientes a los 3 niveles (2 tablas por nivel) junto con los gráficos correspondientes para visualizarlo más fácilmente. En cada tabla se marca de color la celda del método que más se aproxime a los datos medidos. Se observarán dos colores según se aproximen más a los resultados del sonómetro (color rosa) o a los de ARTA (color gris). En caso de que un mismo valor sea el más próximo a ambos, irá de color azul. Para cada recinto y nivel, cabe recordar que las fórmulas utilizadas representan métodos diferentes de cálculo en función del tipo de campo sonoro, por lo que es de esperar que algunos resultados estén fuera de lugar en ciertas medidas. Por otra parte, también recordar que se ha tenido en cuenta la absorción del aire en todos los recintos tras comparar con absorción y sin ella, por lo que se ha considerado que tenerla en cuenta daba resultados mas reales. Todos los métodos han sido simulados y calculados con MATLAB y se ha buscado la máxima aproximación de acuerdo al alto número de superficies según el recinto.

La primera tabla (tabla 3.23) muestra los valores correspondientes a la sala de control del Nivel 1. El método más aproximado de los predictivos es el propuesto por Sabine dado que coincide en 3 bandas para ambas señales y en todas las de ruido rosa. Éste tipo de sala es cúbica con poca diferencia de valores de absorción en toda ella.

Frecuencia [Hz]	Modelo [s]	Sonómetro [s]	ARTA[s]	Sabine [s]	Eyring [s]	Fitzroy [s]	Arau [s]
63	0.2	0.8	2.0	0.6	0.5	0.5	2.4
125	0.1	0.7	0.4	0.3	0.2	0.3	2
250	0.1	1.1	0.6	0.9	0.3	0.3	2.1
500	0.5	1.0	0.4	1.4	0.2	0.2	1.8
1000	0.2	0.9	0.5	1.1	0.1	0.1	1.4
2000	0.2	0.7	0.5	1.0	0.0	0.0	1.1
4000	0.3	0.9	0.6	1.0	0.0	0.0	1.1
5000	0.2	0.9	0.7	1.0	0.0	0.0	1.1

Tabla 3.23: Tabla Nivel 1 Sala de Control

Conforme aumenta la frecuencia Fitzroy y Eyring convergen a 0, a pesar de empezar próximos a Sabine en baja frecuencia. Arau comienza muy lejano de los valores medidos, convergiendo a estos según aumenta la frecuencia y coincidiendo casi con Sabine en las dos últimas octavas representadas. Por su parte, Joaquín se aproxima en media frecuencia a los valores que daba la señal tipo sweep, pero quedándose casi siempre por debajo de ambas señales medidas en general. Dado el tipo de recinto y la baja absorción que tiene, el campo sonoro se podría considerar difuso, teniendo en cuenta también la relevancia hasta 500 Hz de la teoría modal.

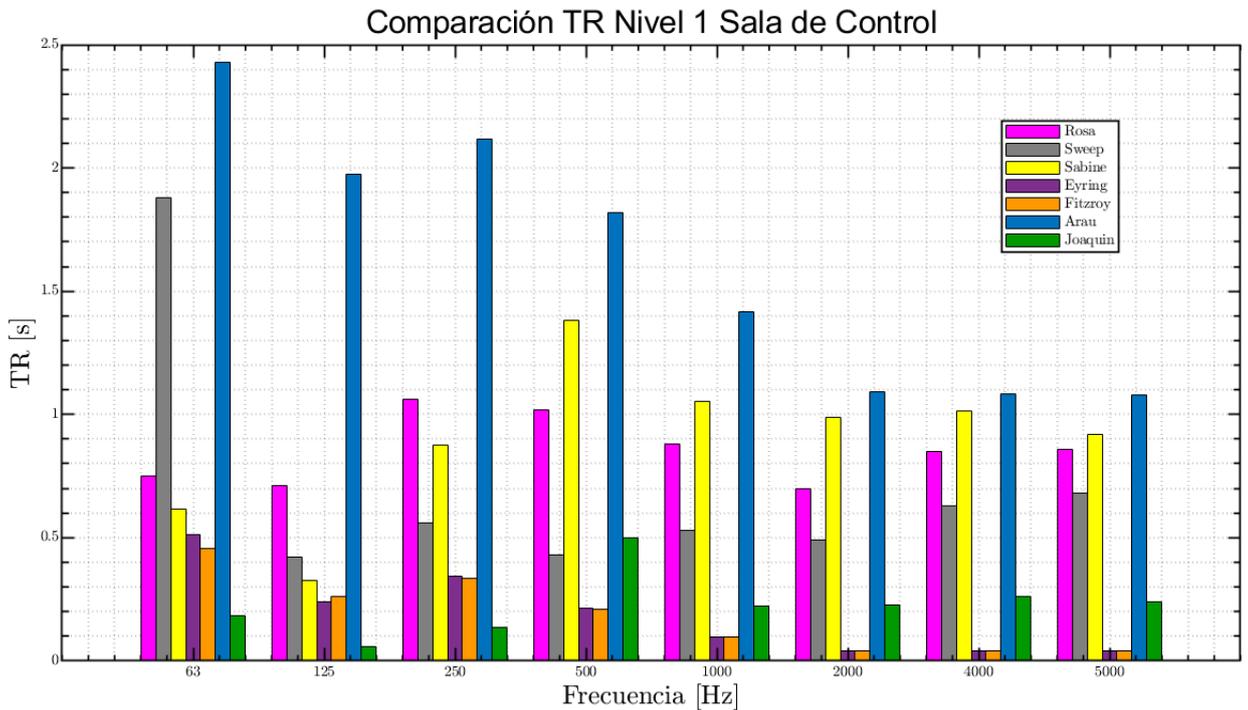


Figura 3.19: Comparativa métodos Sala de Control

Para finalizar éste nivel 1 se analizan los resultados de la sala de grabación. Cabe recordar que por debajo de 250 los resultados de T_R la teoría modal predecía que podían dar valores más aleatorios o extraños. En este caso en la tabla 3.24 aparecen resaltados en azul una cantidad mayor de valores según el modelo de Joaquín, además de ser el más aproximado al valor medido con sonómetro.

Frecuencia [Hz]	Modelo [s]	Sonómetro [s]	ARTA[s]	Sabine [s]	Eyring [s]	Fitzroy [s]	Arau [s]
63	0.6	1.2	0.8	0.9	0.7	0.7	2.7
125	0.3	0.8	0.7	0.5	0.4	0.4	2.2
250	0.6	0.9	0.8	1.6	0.4	0.4	2.3
500	1.1	0.8	0.6	2.1	0.2	0.2	1.8
1000	0.7	1.0	0.7	1.8	0.1	0.1	1.4
2000	0.5	0.8	0.6	1.5	0.0	0.0	1.1
4000	0.5	1.0	0.7	1.5	0.0	0.0	1.1
5000	0.5	1.0	0.7	1.4	0.0	0.0	1.1

Tabla 3.24: Tabla Nivel 1 Sala de Grabación

En la figura 3.20 se aprecia como nuevamente Arau da valores muy lejanos a los medidos, pero que converge según aumenta la frecuencia, coincidiendo con algunos de los resultados medidos. Sabine en este caso es válido en las bandas en las que la teoría modal está presente, mientras que se aleja para el resto de bandas. Cómo se ha mencionado en el párrafo anterior, Joaquín es el método que a proporcionado resultados predictivos más próximos a las medidas.

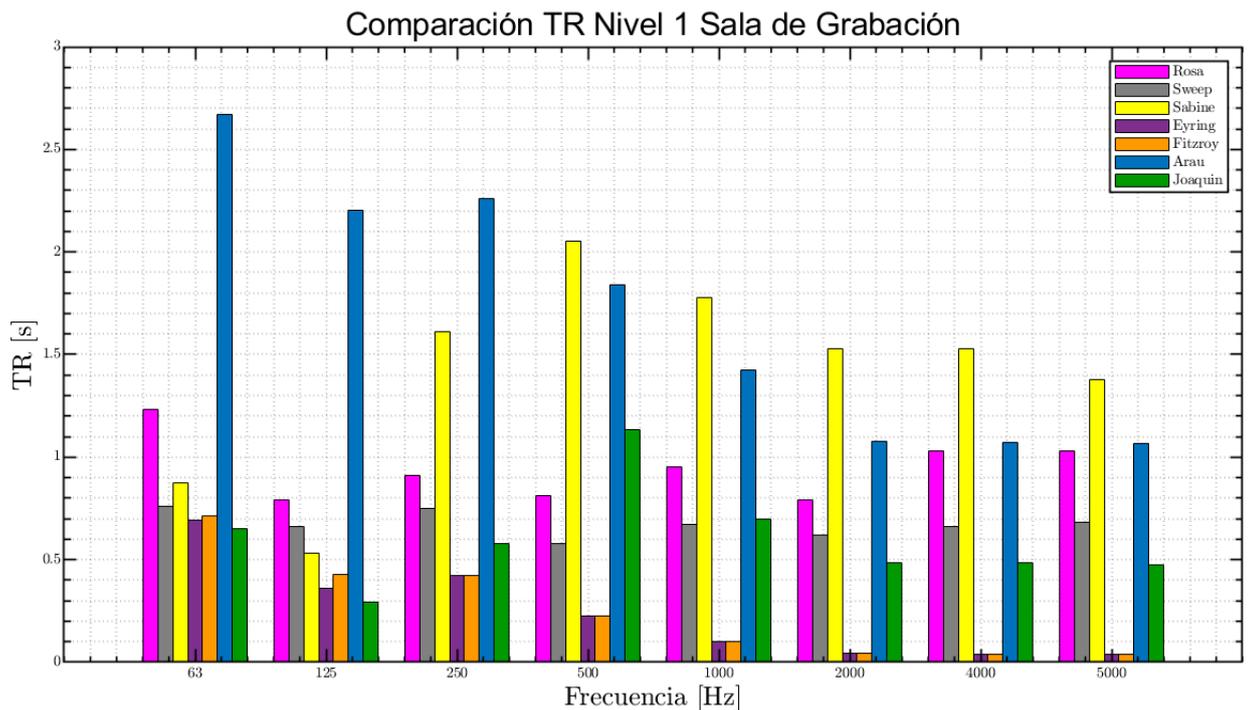


Figura 3.20: Comparativa métodos Sala de Grabación

Se comienza el Nivel 2 mostrando la tabla 3.25, en la que se observa resaltado en azul los valores que más se han aproximado a ambos resultados. Para éste caso cuando un valor ha sido el más cercano a uno de los medidos, lo ha sido para ambas señales.

Frecuencia [Hz]	Modelo [s]	Sonómetro [s]	ARTA[s]	Sabine [s]	Eyring [s]	Fitzroy [s]	Arau [s]
63	1.5	1.1	0.5	1.6	1.1	1.1	3.1
125	1.0	0.7	0.7	0.9	0.5	0.5	2.4
250	2.1	0.6	0.6	2.0	0.5	0.5	2.3
500	2.0	0.8	0.7	1.8	0.2	0.2	1.9
1000	1.8	0.8	0.8	1.8	0.1	0.1	1.5
2000	1.6	1.0	0.7	1.5	0.0	0.0	1.2
4000	2.0	1.0	0.8	1.6	0.0	0.0	1.2
5000	1.8	1.0	0.8	1.5	0.0	0.0	1.2

Tabla 3.25: Tabla Nivel 2 Sin Fondo

Respecto a la visualización en la figura 3.21, en baja frecuencia son Eyring y Fitzroy los mas cercanos, pero su convergencia a cero hace que vayan disminuyendo alejándose de los valores medidos a partir de media-alta frecuencia. A partir de éstas frecuencias es Arau el que se asemeja a los resultados poco a poco. Si la frecuencia siguiera creciendo parece ser que tenderían a coincidir los resultados con Arau. Por su parte Sabine da alto en comparación con los resultados, asemejándose solo a baja frecuencia. Joaquín se aproxima a baja frecuencia, provocando una separación a partir de 250 Hz y tendiendo a los resultados conforme aumenta la frecuencia, aunque de una forma lejana todavía.

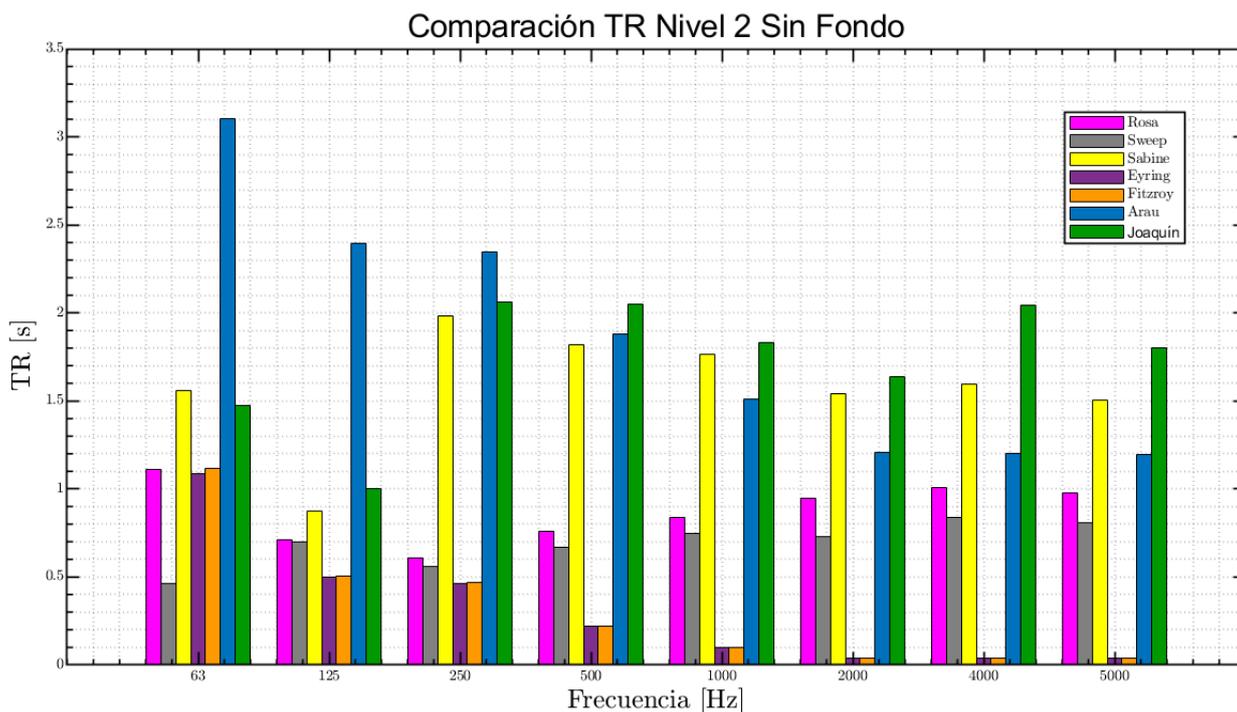


Figura 3.21: Comparativa métodos Alcey sin fondo

Ahora se muestran los resultados con la sala del Nivel 2% acabada. En la tabla 3.26 los resultados son un tanto dispares, y mostrando aparentemente a Sabine como el método más certero en este tipo de recinto que muestra cierta homogeneidad en lo que a absorción se refiere y que, dado el tamaño además, podría considerarse que el campo sonoro es difuso. Joaquín podría ser la siguiente alternativa a tomar a la hora de predecir el T_R en este recinto ya terminado sobretodo a partir de las frecuencias medias-altas.

Frecuencia [Hz]	Modelo [s]	Sonómetro [s]	ARTA [s]	Sabine [s]	Eyring [s]	Fitzroy [s]	Arau [s]
63	1.2	0.9	0.7	1.2	0.9	1.0	3.0
125	0.8	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	2.3
250	1.3	0.7	0.7	1.2	0.4	0.4	2.3
500	1.2	0.8	0.8	1.1	0.2	0.2	1.9
1000	1.1	0.9	0.9	1.1	0.1	0.1	1.5
2000	1.0	1.0	0.9	1.0	0.0	1.2	1.2
4000	1.2	1.1	1.1	1.0	0.0	0.0	1.2
5000	1.1	1.1	1.0	0.9	0.0	0.0	1.2

Tabla 3.26: Tabla Nivel 2 Con Fondo

En la figura 3.22 se observa mejor los resultados obtenidos para este caso, en el que Arau da lejano de forma constante a los resultados medidos en baja frecuencia, pero aproximándose a éstos según avanza la frecuencia. En este caso no se debería hablar de convergencia, pues las medidas de T_R muestran resultados que no tienden a un punto concreto, sino que son bastante homogéneos independientemente de la banda frecuencial a observar. Joaquín se aproxima según la banda frecuencial en mayor o menor cantidad, pero sobretodo a valores altos de frecuencia.

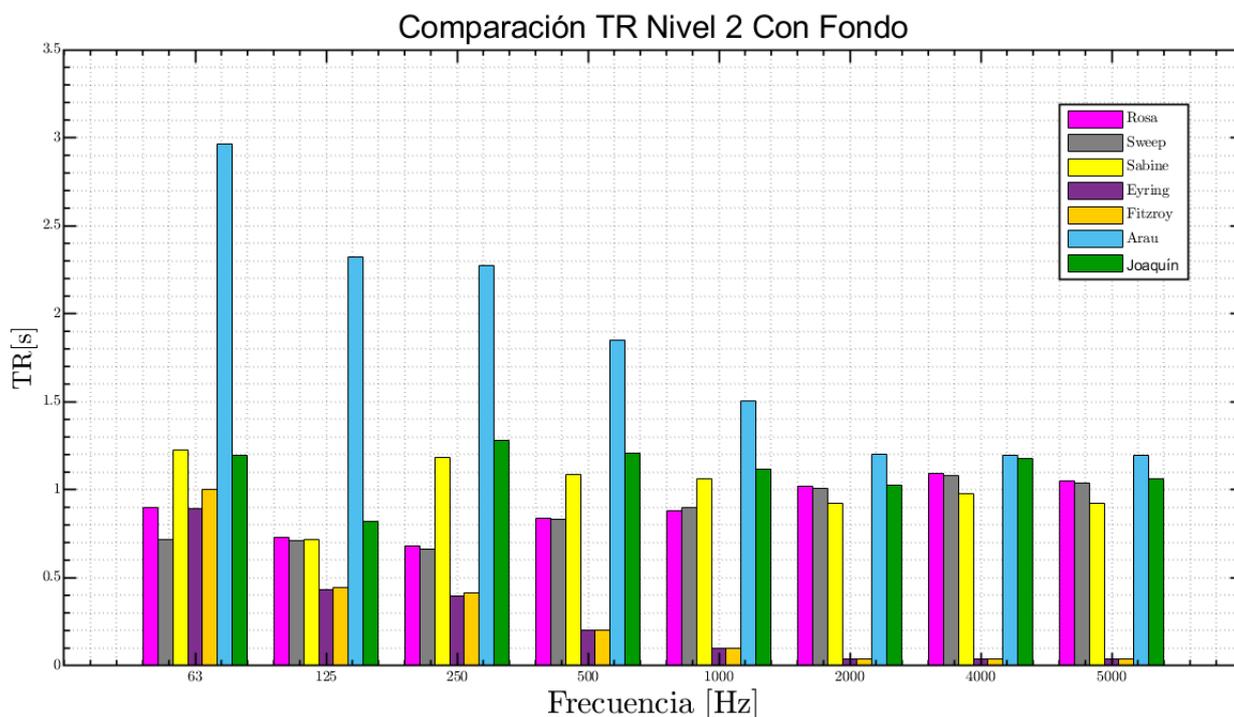


Figura 3.22: Comparativa métodos Alcoy con fondo

Comenzando con los resultados del nivel 3, la tabla 3.27 muestra resaltados en azul los valores que han sido más próximos a ambos métodos, como se ha hecho previamente. A alta frecuencia es Arau el que converge a los resultados medidos, mientras que Sabine parece servir en el resto de bandas, donde ha sido coincidente en más próximo a ambas señales en 6 de éstas bandas. Aunque por tamaño de recinto se podría empezar a pensar en campo sonoro no difuso, dada la ausencia de butacas, la absorción era muy equivalente en toda la sala, generando un campo que tendería a ser mas difuso.

Frecuencia [Hz]	Modelo [s]	Sonómetro [s]	ARTA [s]	Sabine [s]	Eyring [s]	Fitzroy [s]	Arau [s]
63	1.2	2.2	2.1	2.7	1.6	1.5	3.4
125	1.4	3.6	3.3	3.2	0.9	0.9	2.9
250	1.6	4.4	4.1	3.6	0.5	0.5	2.4
500	1.2	3.8	3.6	3.4	0.2	0.2	1.9
1000	1.0	3.3	3.2	3.4	0.1	0.1	1.6
2000	0.6	3.1	3.0	3.2	0.0	0.0	1.2
4000	0.6	2.6	2.5	3.5	0.0	0.0	1.3
5000	0.6	2.3	2.2	3.6	0.0	0.0	1.3

Tabla 3.27: Tabla Nivel 3 Sin Butacas

Observando la figura 3.23 se hace notar la tendencia decreciente de Eyring y Fitzroy a cero con el aumento de la frecuencia y la divergencia de Sabine a alta frecuencia. Joaquín por su parte da valores muy bajos en comparación con los resultados medidos y generando una forma de reparto frecuencial similar a la de Arau, pero por debajo de éste.

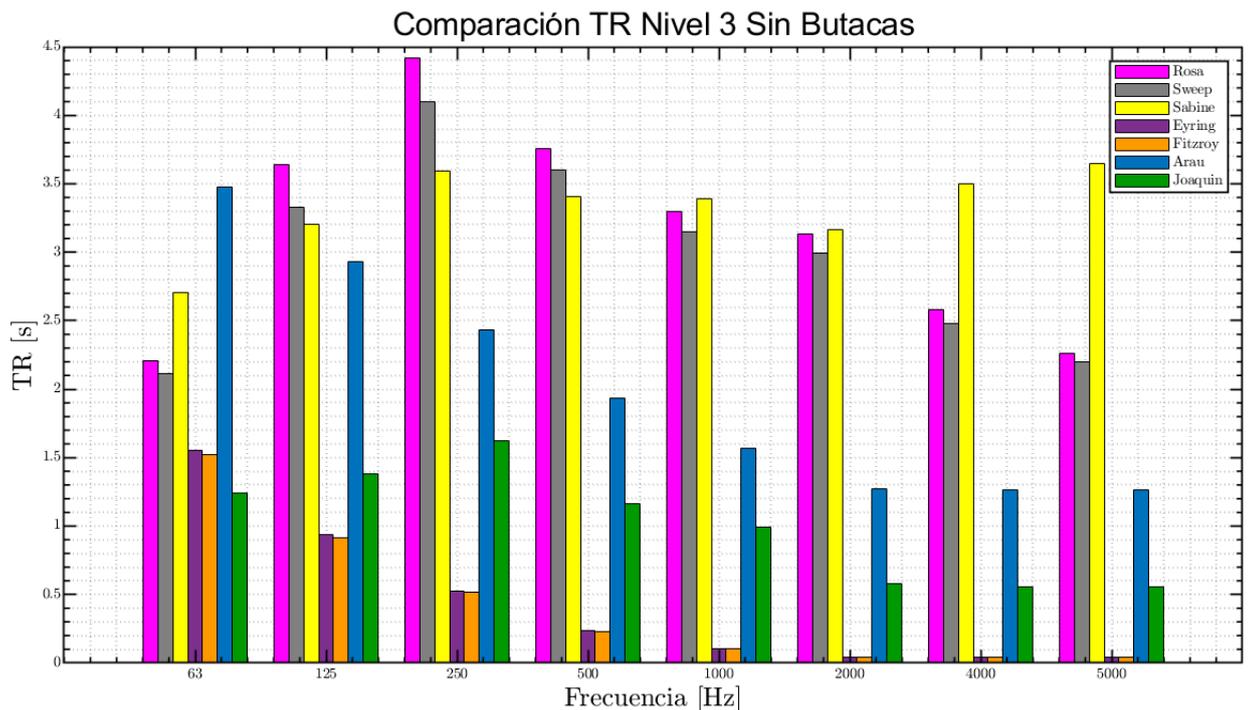


Figura 3.23: Comparativa métodos Beniarbeig sin butacas

A continuación se muestra la tabla 3.28 y el figura 3.24 correspondientes con las medidas del nivel 3 con butacas. Dado el tamaño y la variedad en los coeficientes de absorción, lo esperado es que se tenga un campo no difuso, en el que Fitzroy o Arau tuvieran especial dominación sobre el resto de métodos. Como era de esperar observando la tabla 3.28, son Sabine y Arau los mas relevantes en ésta situación, pues aunque aparezca Sabine resaltado, los valores de Arau en alta frecuencia son similares, es decir, sus valores convergen en alta frecuencia.

Frecuencia [Hz]	Modelo [s]	Sonómetro [s]	ARTA [s]	Sabine [s]	Eyring [s]	Fitzroy [s]	Arau [s]
63	1.2	1.9	1.6	1.6	1.1	1.0	3.0
125	1.3	1.8	1.9	1.7	0.7	0.7	2.7
250	1.4	2.1	2.0	1.7	0.4	0.4	2.3
500	1.0	2.2	2.0	1.5	0.2	0.2	1.9
1000	0.8	2.2	2.0	1.5	0.1	0.1	1.6
2000	0.5	2.1	1.9	1.4	0.0	0.0	1.3
4000	0.5	1.7	1.6	1.5	0.0	0.0	1.3
5000	0.5	2.2	1.5	1.5	0.0	0.0	1.3

Tabla 3.28: Tabla Nivel 3 Con Butacas

Observando la figura 3.24 se aprecia más fácilmente la convergencia antes mencionada. Eyring y Fitzroy tienden a valores muy bajos de T_R según aumenta la frecuencia. Dado que Eyring está pensado para campo difuso, éste puede ser uno de los motivos por el que ocurre esto, lo cual no es tan entendible para Fitzroy. Sabine se mantiene de una forma constante aproximadamente y cercano a los valores medidos. Joaquín por su parte se mantiene bajo de una forma también constante y, al igual que en la situación anterior, repitiendo al forma de reparto de señal de Arau, pero con valores por debajo de los tiempos de reverberación medidos. A pesar de ser un tanto lejano en baja frecuencia, es claro que la fórmula de Arau, junto con la de Sabine, son las que mejor se ajustan a este tipo de recintos.

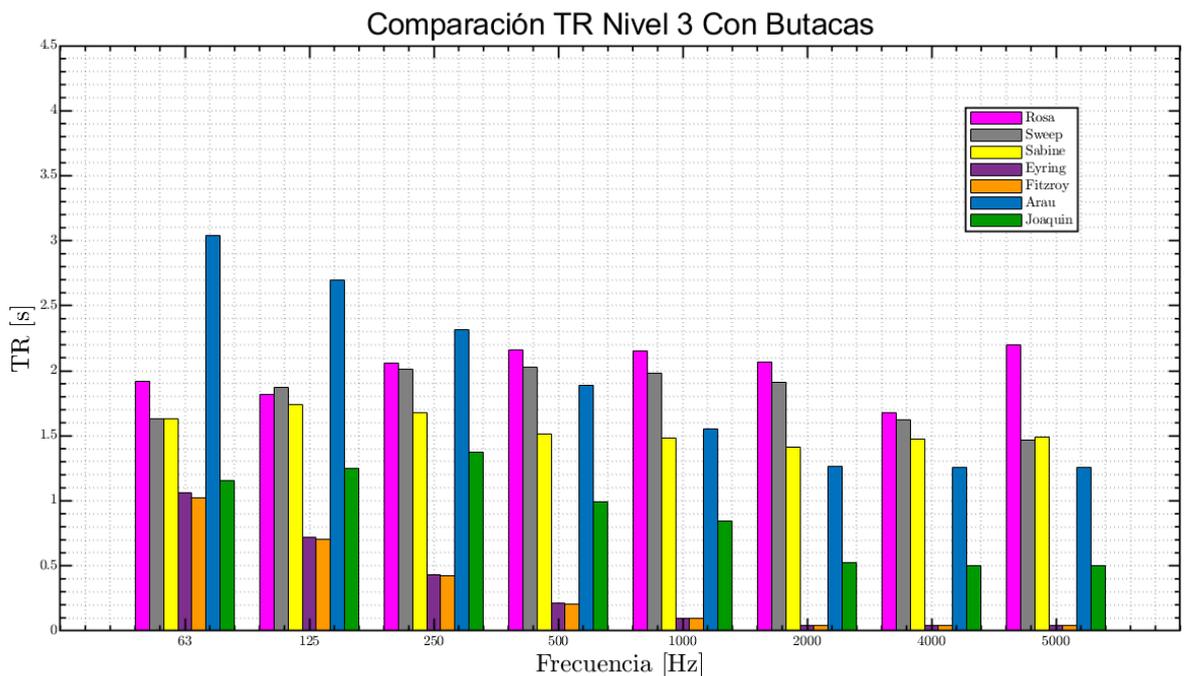


Figura 3.24: Comparativa métodos Beniarbeig con butacas

Capítulo 4

Conclusiones

El presente capítulo está centrado en las conclusiones del trabajo.

Con respecto a los parámetros de calidad, comenzar comentando que todos los recintos se ajustan en mayor o menor medida a los parámetros objetivo de los mismos. El nivel 1 tiene un buen nivel para el uso de la palabra, pero un brillo y una calidez que se exceden un tanto por arriba y por abajo, respectivamente. Con cierto acondicionamiento podrían mejorarse fácilmente. En cuanto a las definiciones y claridades de la voz, se encuentran por encima del esperado, por lo que son adecuadas. La claridad musical es el peor parámetro de calidad, el cual no es el más relevante en este tipo de recinto. El nivel 2, que vuelve a estar orientado más a la palabra que a la música, también se encuentra adecuado en los parámetros que afectan a ésta. Le falta algo de calidez, y le sobra un poco de brillo, los cuales se espera que entren en los rangos esperados con la ocupación de las salas. El nivel 3 es el que mejor claridad musical tiene, y mejor que se espera con la ocupación de la sala, lo cual es muy importante dado que es un auditorio destinado a música. La claridad de la voz en segundo lugar, pero también importante (teatro, poesía, monólogos, etc), todavía tiene que mejorar, esperando que dicha mejora se propicie gracias a la ocupación de la sala. El resto de parámetros son correctos en esta sala, dando fuera de lugar únicamente el porcentaje de consonantes, siendo un parámetro a mejorar, o esperar que mejore con la ocupación de la audiencia.

Efectivamente se han revisado los métodos clásicos viendo para qué casos son más óptimos. Sabine, que siempre aparece como referencia, se cumple notablemente en los casos de campo difuso, como pueden ser la sala de control del Nivel 1, la obra finalizada en el Nivel 2 y el auditorio sin butacas en el Nivel 3, aunque para la colocación de las butacas también se cumple bastante bien pues es altamente homogéneo el auditorio en lo que a absorción se refiere. Eyring y Fitzroy coinciden en gran parte en el caso de sin Fondo del Nivel 2, un caso en el que el campo comparte reparto de energía difuso y no difuso, pues al no estar colocadas ciertas piezas de la obra todavía, había mucha variabilidad en los índices de absorción. Arau por su parte tiende a converger a los resultados medidos en alta frecuencia en todos los recintos a excepción de la sala de control, donde su tamaño afecta notablemente a éste tipo de teoría, y obtiene especialmente buenos resultados en el caso del auditorio con butacas y en el nivel 2 sin fondo, por ser los dos espacios más parecidos a campo no difuso.

Otro de los objetivos era introducir un nuevo método que se basara en tener en cuenta el ángulo sólido y la diferencia entre superficies de primera reflexión y posteriores. En la sala de grabación y en la sala de conferencias con fondo es donde mejor resultado se ha obtenido con éste método, dando a entender que para campo difuso podría ser una buena opción, quedando todavía por mejorar para campo no difuso. Habría que tener en cuenta la posibilidad de separar en diferentes términos según dirección, siguiendo la línea de Arau-Puchades, pero quizás no solo en 3 direcciones, se verá en traba-

jos futuros. Por tanto, ésta fórmula, de momento, no optimiza los métodos clásicos, convirtiéndose de forma empírica en un método muy concreto de resolución y no tan genérico como se esperaba encontrar.

En último lugar, mencionar como líneas futuras la continuación en el estudio de parámetros de calidad y terminación de algunas medidas a sala ocupada. Al igual que para éste trabajo, centrando la atención en el tiempo de reverberación, y buscando una fórmula general que pudiera servir para cualquier recinto o situación de campo sonoro. Dicha fórmula deberá cumplir el principio de Cremer de permitir calcular el EDT también y estar demostrada matemáticamente, para ser al cien por cien rigurosa.

Bibliografía

- [1] Ivana Rosell Pere Artís. Reverberation time in rooms with non-diffuse sound field **2007**. *International Symposium on room acoustics, Seville 2007*.
- [2] Antoni Carrión Isbert. Diseño acústico de espacios arquitectónicos, **1998**. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona, 1a Edición.
- [3] Lidia Álvarez Morales, Miguel Galindo, Javier Santamaria, Teófilo Zamarreño Teresa Gómez Gómez. Reverberation perception in Spanish cathedrals **2019**. *Inter Noise 2019*.
- [4] Higiní Arau-Puchades. Revisión del tiempo de reverberación: el método de cálculo, la precisión predictiva y la ley **2010** *Tecniacústica, León 2010*.
- [5] Carl F. Eyring. Methods of calculating the average coefficient of sound absorption **1933**. *The Journal of the Acoustical Society of America* 4, 178 (1933). 10.1121/1.1915599.
- [6] Carl F. Eyring. Reverberation time measurements in coupled rooms **1931**. *The Journal of the Acoustical Society of America* 3, 181 (1931). 10.1121/1.1915555.
- [7] Higiní Arau Puchades. An improved reverberation formula. *International Journal on acoustics* **2015**, Vol. 65.
- [8] Higiní Arau-Puchades. Nueva versión y reflexiones sobre la teoría «An Improved Reverberation Formula» **2014** *Revista de acústica — Vol. 45 — N^{os} 1 y 2.*
- [9] Higiní Arau Puchades Alessandro Ratto. EDT and RT: “The uniformity and non-uniformity in the distribution of absorption in a reverberant room is it a discussion between them?” **2019**. *Inter Noise 2019*.
- [10] Higiní Arau Puchades & Umberto Berardi. A Revised Sound Energy Theory Based on a New Formula for the Reverberation Radius in Rooms with Non-Diffuse Sound Field. *Polska Akademia Nauk* **2015**, Vol. 40, No. 1, 33–40.

- [11] Helena Alves Santos. Estudio Comparativo de los Parámetros Acústicos de la Norma UNE-EN ISO 3382-1 Medidos con Fuente Puntual y con el Sistema de Refuerzo Sonoro en Salas de Cine **2014**. Trabajo de final de máster, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.
- [12] . J. Ducourneau V. Planeau. The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption. *Applied Acoustics* **2003**, 64. 845-862. doi:10.1016/S0003-682X(03)00047-1.
- [13] . Higini-Arau Puchades. La arquitectura del sonido en la geometría de los espacios **2014**. Conferencia Cersaie en Bologna 2014.
- [14] Juan L. Rioperez Rodriguez, Luis Gomez Agustina Robert I. Adnitt. Acoustic analysis of sound transmission in a mixed-use development using Statistical Energy Analysis **2019**. *Inter Noise 2019*.
- [15] Manuel Vázquez Rosado. Estudio acústico de las aulas abovedadas en el Edificio Sabatini de la Universidad Carlos III de Madrid **2011** *Trabajo de final de grado*.
- [16] Andrea Prato, Federico Casassa & Alessandro Schiavi. Reverberation time measurements in non-diffuse acoustic field by the modal reverberation time. *Applied Acoustics* **2016**, 110. 160-169. 10.1016/j.apacoust.2016.03.041.
- [17] . Marc Aretz Raf Orłowski. Sound strength and reverberation time in small concert halls. *Applied Acoustics* **2009**, 70. 1099-1110. doi:10.1016/j.apacoust.2009.02.001.
- [18] Ezgi Turk Gurkan Zerhan Yuksel Can. Effects of the Time Related Absorption Changes of Materials on Room Acoustics **2019**. *Inter Noise 2019*.
- [19] A. Pereira, A. Gaspar, L. Godinho, P. Amado Mendes D. Mateus. Sound absorption assesment of variable perforated shapes for room acoustic design **2019**. *Inter Noise 2019*.
- [20] . Joan Martínez Millet. Estudio del acondicionamiento acústico y propuestas de mejora del auditorio Antonio Cabeza de Paterna, **2019**. *Trabajo final de grado*. Universidad Politécnica de Valencia - Escuela Politécnica Superior de Gandía.