



Escuela
Politécnica
Superior

Estudio de la relación campo directo/reverberado; útil/perjudicial



Grado en Ingeniería en Sonido e
Imagen en Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor:

Jose Manuel Requena Plens

Tutor/es:

Jenaro Vera Guarinos

Diciembre 2018

Estudio de la relación campo directo/reverberado; útil/perjudicial

Basado en la teoría moderna y modelos acústicos

Autor

Jose Manuel Requena Plens

Tutor/es

Jenaro Vera Guarinos

Departamento de física, ingeniería de sistemas y teoría de la señal



Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen en Telecomunicación



Escuela
Politécnica
Superior



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ALICANTE, Diciembre 2018

Abstract

The separation in direct field and late field is correct although it has no use in the practice, due to the fact that the physiology of the human ear assembles the direct field and some of the first reflections making our brain believe that it all belongs to one only sound. This concept was developed by Hass (1951), where it is demonstrated that up to a certain instant of time all the sound received is integrated and the brain processes it as an only sound without reflexions and moreover it locates its origin at the place where the first sound has been received. The time defined by Hass for the spoken communication is 50 milliseconds, that is to say, all sound (direct and reflected) until 50 milliseconds have passed by is integrated by the auditive human system and understood as an only sound, this concept provoked that the nomenclature was used more conveniently for the direct field, early field (englobes all sound after the direct field until 50 ms) and late field (all sound after 50ms).

The late field defined as the field comprised from 50 milliseconds, arrives after the time in which the human ear integrates the sound as an only one and interferes with the sound that it was pretended to be heard. It is therefore that the acoustic fields can be named as useful field (direct field and early field) and useless field (late field from 50 milliseconds).

Taking into consideration the concepts of useful field and useless field and, understanding the importance of its relationship on the intelligibility of the word, we can comprehend the importance of the capacity to mathematically calculate the fields the most correct way. Nowadays there are a multitude of equations that, although being quite close to the experimental behaviour of the acoustic fields, are not completely correct and so they cannot be used to anticipate the behaviour. The last calculations developed by Barron and Lee (1988) are some of the few that considerate the temporary separation to mathematically calculate the useful and useless fields, although these calculations don't correspond to the real behaviour as we will see later on this paper.

Given these difficulties we propose a modified calculation of the fields, based on the Barron and Lee equations and inspired by the search of and adjustment in the calculation of Sato and Bradley (2008), where, from a series of experimental measurements or by means of acoustic models, they are compared to the theoretical calculation of the useful and useless fields and adjustment coefficients are searched in order to finally bring out a valid theoretical calculation relating the obtained coefficients to the characteristics of the enclosure.

Resumen

La división entre campo directo y campo reverberante es correcta aunque en la práctica carece de utilidad, debido a que la fisiología del oído humano agrupa el campo directo y algunas de las primeras reflexiones haciendo creer a nuestro cerebro que todo ello constituye un solo sonido. Este concepto fue desarrollado por Hass (1951), donde se demuestra que hasta cierto tiempo todo el sonido recibido se integra y el cerebro lo procesa como un único sonido sin reflexiones y además ubica el origen del sonido en el lugar de donde se ha recibido el primer sonido. El tiempo definido por Hass para la comunicación hablada es de 50 milisegundos, es decir, todo sonido (directo y reflejado) hasta transcurridos los 50 milisegundos es integrado por el sistema auditivo humano y entendido como un único sonido, este concepto produjo que se utilizara más convenientemente la nomenclatura de campo directo, campo temprano (engloba todo sonido después del campo directo hasta los 50 ms) y campo reverberante (todo sonido después de los 50 ms).

El campo reverberante definido como el campo comprendido desde los 50 milisegundos, llega después del tiempo en el que el oído humano integra el sonido como uno solo e interfiere en el sonido que se pretendía oír. Es por ello que los campos acústicos se pueden denominar como campo útil (campo directo y campo temprano) y campo perjudicial (campo reverberante desde los 50 ms).

Teniendo en cuenta el concepto de campo útil y campo perjudicial y, entendiendo la importancia de la relación de éstos en la inteligibilidad de la palabra, se puede comprender la importancia de poder calcular matemáticamente los campos de la forma más correcta posible. Actualmente existen multitud de ecuaciones que si bien se aproximan al comportamiento experimental de los campos acústicos no son del todo correctos y por tanto no se pueden utilizar para prever el comportamiento. Los últimos cálculos desarrollados por Barron y Lee (1988) son de los pocos que tienen en cuenta una separación temporal para calcular matemáticamente el campo útil y perjudicial, aunque como se verá en este trabajo estos cálculos no se corresponden con el comportamiento real.

Ante esta problemática se propone un cálculo modificado de los campos, basado en las ecuaciones de Barron y Lee e inspirado en la búsqueda de un ajuste en el cálculo de Sato y Bradley (2008), donde, a partir de una serie de medidas experimentales o mediante modelos acústicos, se comparan con el cálculo teórico de los campos útil y perjudicial y se buscan coeficientes de ajuste para obtener finalmente un cálculo teórico válido relacionando los coeficientes obtenidos con las características del recinto.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y confianza de Jenaro Vera Guarinos. Aún recuerdo aquel día en la terraza del bar de la Escuela Politécnica Superior cuando Jenaro se sentó sin previo aviso en la mesa donde estábamos unos amigos y yo y me dijo: “Tengo algo que proponerte”, no lo dudé y me tiré a la piscina, algo de lo que me alegraré toda la vida. En la vida académica es difícil encontrar personas que se interesen y apoyen la carrera de otra persona sin buscar un mínimo provecho propio, pero en Jenaro he encontrado la excepción. La ayuda ha sido crucial, no el concepto de ayuda en el que una persona te libera de parte de la carga de trabajo, sino la de mostrar los caminos por donde dar las primeras pedaladas con ruedines y que después se aprende a prescindir de ellos. Confío en mí no sólo para este trabajo sino también, a fecha de hoy, para realizar varias comunicaciones para congresos sobre la misma temática de este trabajo.

También debo agradecer a mis padres la confianza que no debería merecer, no he sido la persona de la que se espera que llegue a la universidad y aun así han sido en todo momento un gran apoyo.

Han sido años de conocer a muchos compañeros de estudios, días y días de apoyo mutuo con tantos de ellos que no es posible mencionarlos a todos y todas, les agradezco la ayuda bidireccional aunque realmente no les menciono porque sino se les sube a la cabeza.

A todos y todas les dedico este trabajo.

*El modo de dar una vez en el clavo
es dar cien veces en la herradura.*

Miguel de Unamuno

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Cronología de la acústica	1
1.2. Los campos acústicos	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Parámetros básicos	5
2.1.1. Directividad	5
2.1.2. Factor e índice de directividad	6
2.1.3. Potencia acústica	7
2.1.4. Intensidad acústica	8
2.1.5. Presión acústica	8
2.1.6. Divergencia esférica	8
2.1.7. Divergencia cilíndrica	9
2.1.8. Densidad del aire	10
2.1.9. Velocidad del sonido en el aire	10
2.1.10. Impedancia acústica específica del aire	11
2.1.11. Escala logarítmica	11
2.1.12. Relación entre presión y potencia o intensidad acústica	12
2.1.13. Bandas de frecuencia	12
2.1.14. Ponderación A	13
2.1.15. Suma de niveles	13
2.1.16. Ruido rosa/blanco	14
2.1.17. Nivel continuo equivalente	15
2.2. Parámetros de acústica de recintos	16
2.2.1. Acústica geométrica	16
2.2.2. Modos propios	17
2.2.3. Coeficiente de absorción medio	18
2.2.4. Absorción acústica	19
2.2.5. Constante del recinto	19
2.2.6. Camino libre medio en acústica	19
2.2.7. Tiempo de reverberación	22
2.3. Parámetros de inteligibilidad y calidad acústica	23
2.3.1. Claridad C50,C80	23
2.3.2. Definición D50,D80	25
2.3.3. Sonoridad G	25
2.3.4. Índice de articulación AI	26
2.4. Teoría de campos acústicos	27
2.4.1. Campos directo y reverberado	27
2.4.1.1. Distancia crítica	29

2.4.2. Teoría revisada o moderna	29
2.4.3. Teoría revisada corregida	31
2.5. Otros conceptos	34
2.5.1. Señal MLS	34
2.5.2. Respuesta al impulso	35
3. Objetivos	37
3.0.0.0.1. Validación de modelos	37
3.0.0.0.2. Factores de corrección para el cálculo de campos acústicos	38
3.0.0.0.3. Desarrollo de herramientas	38
4. Desarrollo	41
4.1. Mediciones in situ	41
4.1.1. Aula OP/S003	41
4.1.2. Aula EP/0-26M	45
4.2. Validación de modelos	51
4.2.1. CATT-Acoustic	51
4.2.1.1. Aula OP/S003	53
4.2.1.2. Aula EP/0-26M	55
4.2.2. EASE	57
4.2.2.1. Aula OP/S003	58
4.2.2.2. Aula EP/0-26M	61
4.3. Selección de modelos	63
4.4. Obtención de coeficientes	65
4.4.1. Escalado de los recintos	65
4.4.2. Método de obtención de coeficientes	66
4.5. Inteligibilidad	67
5. Resultados	69
5.1. Recintos sin modificar	69
5.1.1. Comparación de los valores obtenidos frente a los predichos	71
5.1.2. Inteligibilidad	72
5.1.2.1. OP/S003	73
5.1.2.2. EP/0-26M	74
5.2. Recintos escalados	76
5.2.1. Aula OP/S003	76
5.2.1.1. Fuente en el centro	76
5.2.1.2. Fuente en la esquina	77
5.2.2. Aula EPS/0-26M	78
5.2.2.1. Fuente en el centro	78
5.2.2.2. Fuente en la esquina	79
5.2.3. Comparación de coeficientes	80
5.2.4. Relación de coeficientes con las características del recinto	84

6. Conclusiones	87
6.1. Validación de modelos	87
6.2. Teoría revisada corregida	89
6.3. Relación de coeficientes con las características del recinto	90
Bibliografía	91
A. Programas desarrollados	97
A.1. CATT2Matlab	97
A.1.1. Datos generales	98
A.1.2. Parámetros acústicos	98
A.1.3. Historia temporal	99
A.1.4. Otros detalles	101
A.2. EASEPostFile2Matlab	102
A.2.1. Automatización de exportación	102
A.2.2. Programa	104
A.2.3. Datos generales	105
A.2.4. Historia temporal	105
A.3. dBFA2Matlab	107
B. Tablas de resultados	109

Índice de figuras

2.1. Diagrama de directividad de un altavoz de dos vías. Se representa la directividad emitiendo dos frecuencias diferentes.	6
2.2. Modificación del factor de directividad producido por uno o varios planos.	7
2.3. Compresión y enrarecimiento de un muelle como ejemplo de la variación de presión producida por ondas acústicas.	8
2.4. Representación gráfica de la divergencia esférica respecto a la distancia. Autor de la figura original: <i>Borb</i> , de Wikipedia.	9
2.5. Representación gráfica de la divergencia cilíndrica respecto a la distancia.	10
2.6. Representación de ruido blanco tanto en lineal como por octavas.	14
2.7. Representación de ruido rosa tanto en lineal como por octavas.	15
2.8. Representación de señal captada y su L_{eq}	15
2.9. Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor. Figura extraída y modificada de Carrión (1998), pág. 51.	16
2.10. Ejemplo básico de interferencia de ondas (100 Hz) en dos dimensiones frente a la distancia.	17
2.11. Trazado de rayos para calcular el camino libre medio (promedio de R_i). Figura extraída y modificada de Self y cols. (2009), pág. 109.	20
2.12. a) Modelos utilizados para el cálculo de MFP por Vern O. Knudsen. Figura extraída del libro Knudsen (1932), pág. 140. b) Resultados obtenidos con el cálculo de MFP por Vern O. Knudsen. Tabla extraída del libro Knudsen (1932), pág. 141.	21
2.13. Diagrama de la definición de tiempo de reverberación.	22
2.14. Diagrama de la definición de EDT, T20 y T30.	22
2.15. Valores de corrección de AI según tiempo de reverberación.	26
2.16. Ecograma asociado a un receptor con indicación del campo directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante. Figura extraída de Carrión (1998), pág. 50.	27
2.17. Comparación de los campos acústicos obtenidos experimentalmente y mediante la ecuación Hopkins-Stryker. El tiempo de integración del experimental es 0-1 ms para el campo directo y 1-∞ para el campo reverberante.	28
2.18. Comparación de los campos acústicos obtenidos experimentalmente y mediante Barron y Lee (1988). El tiempo de integración es 50 ms.	31
2.19. Comparación de los campos tempranos (1ms-50ms) del aula OP/S003, EP/0-26M, teórico según Sato y Bradley (2008) y teórico propuesto por el autor de este trabajo.	32
2.20. Comparación de los campos acústicos obtenidos experimentalmente y mediante la teoría revisada corregida. El tiempo de integración es 50 ms y los coeficientes: $\epsilon_L = 1.244$, $C_L = 1.268$, $C_D = 1.070$, $\epsilon_E = -0.296$ y $C_E = 3.588$	34

2.21. Fracción temporal de una señal MLS.	35
2.22. Respuesta al impulso de un sistema.	35
3.1. Proceso para separar los campos útil y perjudicial a partir de un ecograma. Ejemplo de un receptor a 2 metros de la fuente.	37
3.2. Resultado al separar los campos útil y perjudicial a partir de ecogramas de múltiples receptores a diferentes distancias de la fuente.	37
3.3. Diagrama de la metodología aplicada para la validación de modelos.	38
3.4. Diagrama de los pasos para la obtención de coeficientes y posterior análisis. .	39
4.1. Aula OP/S003.	42
4.2. Puntos de recepción (círculos blancos) y fuentes (rectángulos rojos) en aula OP/S003.	43
4.3. Campos acústicos en el aula OP/S003 con mobiliario. 48 puntos de medida. .	43
4.4. Campos acústicos en el aula OP/S003 sin mobiliario. 22 puntos de medida .	44
4.5. Campos útiles (0 a 50ms) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos) .	44
4.6. Campos útiles (0 a 50ms) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos) .	44
4.7. Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos)	45
4.8. Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos)	45
4.9. Aula EP/0-26M.	45
4.10. Puntos de recepción (círculos blancos) y fuentes (rectángulos rojos) en aula EP/0-26M.	46
4.11. Campos acústicos en el aula EP/0-26M con mobiliario. 30 puntos de medida .	47
4.12. Campos acústicos en el aula EP/0-26M sin mobiliario. 30 puntos de medida .	47
4.13. Campos útiles (0 a 50 ms) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos) .	48
4.14. Campos útiles (0 a 50 ms) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos) .	48
4.15. Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos)	49
4.16. Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos)	49
4.17. Campos perjudiciales en las bandas de 125 Hz, 500 Hz, 2 kHz y 4kHz con la fuente en el centro en el aula EP/0-26M sin mobiliario.	50
4.18. Ventana de parámetros para el trazado de rayos en CATT-Acoustic.	52
4.19. Porción de la tabla de datos de un receptor generada por el trazado de rayos en CATT-Acoustic.	53
4.20. Modelos del Aula OP/S003 en CATT-Acoustic.	53

4.21. Campos acústicos en el aula OP/S003 con mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.	54
4.22. Campos acústicos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.	55
4.23. Modelos del Aula EP/0-26M en CATT-Acoustic.	55
4.24. Campos acústicos en el aula EP/0-26M con mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.	56
4.25. Campos acústicos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.	57
4.26. Ventanas de parámetros para el cálculo de la respuesta al impulso en EASE.	57
4.27. Porción de la tabla de datos de un receptor generada por el trazado de rayos en EASE.	58
4.28. Modelos del Aula EP/0-26M en EASE.	59
4.29. Campos acústicos en el aula OP/S003 con mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.	60
4.30. Campos acústicos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.	60
4.31. Modelos del Aula EP/0-26M en EASE.	61
4.32. Campos acústicos en el aula EP/0-26M con mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.	62
4.33. Campos acústicos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.	62
4.34. Verificación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE.	63
4.35. Verificación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE.	64
4.36. Verificación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE.	64
4.37. Verificación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE.	65
4.38. Ventana para modificar la escala del recinto en EASE.	65
4.39. Ejemplo de ajuste de los tres campos acústicos por separado para el aula OP/S003 simulada en EASE y ajustada mediante regresión (líneas discontinuas).	67

5.1. Representación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.195$, $C_L = 1.175$, $C_D = 0.937$, $\epsilon_E = -2.123$ y $C_E = 1.683$	69
5.2. Representación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.244$, $C_L = 1.268$, $C_D = 0.949$, $\epsilon_E = -0.339$ y $C_E = 3.533$	70
5.3. Representación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.081$, $C_L = 0.843$, $C_D = 0.965$, $\epsilon_E = -3.895$ y $C_E = 1.073$	70
5.4. Representación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.084$, $C_L = 0.839$, $C_D = 1.046$, $\epsilon_E = -2.209$ y $C_E = 1.618$	70
5.5. Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula OP/S003 con fuente en el centro. . .	71
5.6. Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula OP/S003 con fuente en la esquina. . .	71
5.7. Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula EP/0-26M con fuente en el centro. . .	72
5.8. Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula EP/0-26M con fuente en la esquina. . .	72
5.9. Claridad y definición obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario con fuente en el centro simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.	73
5.10. Claridad y definición obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario con fuente en la esquina simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.	73
5.11. Sonoridades obtenidas en el aula OP/S003 sin mobiliario con ambas posiciones de fuente simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.	74
5.12. Claridad y definición obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario con fuente en el centro simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.	74
5.13. Claridad y definición obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario con fuente en la esquina simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.	75
5.14. Sonoridades obtenidas en el aula EP/0-26M sin mobiliario con ambas posiciones de fuente simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.	75
5.15. Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulada en EASE con fuente en el centro frente al volumen.	77
5.16. Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulada en EASE con fuente en la esquina frente al volumen.	78
5.17. Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulada en EASE con fuente en el centro frente al volumen.	79
5.18. Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulada en EASE con fuente en la esquina frente al volumen.	80

5.19. Diferencias de las curvas de campo temprano y perjudicial al modificar los coeficientes ϵ_x	80
5.20. Diferencias de las curvas de campo temprano y perjudicial al modificar los coeficientes C_x	81
5.21. Curvas de coeficientes obtenidos en las aulas OP/S003 y EP/0-26M sin mobiliario con fuente en el centro.	81
5.22. Curvas de campo tardío de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en el centro.	82
5.23. Curvas de campo temprano de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en el centro.	82
5.24. Curvas de coeficientes obtenidos en las aulas OP/S003 y EP/0-26M sin mobiliario con fuente en la esquina.	83
5.25. Curvas de campo tardío de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en la esquina.	83
5.26. Curvas de campo temprano de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en la esquina.	84
A.1. Ventana completa del programa CATT2Matlab.	97
A.2. Información general mostrada en CATT2Matlab.	98
A.3. Panel de parámetros acústicos de CATT2Matlab.	99
A.4. Panel de historia temporal de CATT2Matlab.	99
A.5. Mapa SPL en 3D generado con CATT2Matlab.	100
A.6. Representación de niveles frente a la distancia generado con CATT2Matlab.	100
A.7. Mapas de cruce de campos acústicos global y por octavas del programa CATT2Matlab.	101
A.8. Mapas de niveles por octavas para ambos campos acústicos del programa CATT2Matlab.	101
A.9. Vista de desarrollo del robot con WinAutomation.	102
A.10. Selección de archivos y tipo de exportación del robot desarrollado.	103
A.11. Ventana completa del programa EASEPostFile2Matlab.	104
A.12. Información general mostrada en EASEPostFile2Matlab.	105
A.13. Representación de niveles frente a la distancia junto a la teoría revisada corregida generado con EASEPostFile2Matlab.	106
A.14. Representación de un ecograma con EASEPostFile2Matlab.	106
A.15. Representación de claridad con EASEPostFile2Matlab.	107
A.16. Representación de curvas de medidas in situ y teóricas.	108

Índice de tablas

2.1. Frecuencias centrales para las bandas de octava más utilizadas (ISO 266:1997).	13
2.2. Peso de cada banda de octava para el cálculo de AI.	26
4.1. Tiempos de reverberación obtenidos en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario.	42
4.2. Tiempos de reverberación obtenidos en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario.	46
4.3. Tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic (T30 extrapolado).	54
4.4. Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic (T30 extrapolado) respecto a los medidos in situ.	54
4.5. Tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic (T30 extrapolado).	56
4.6. Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic (T30 extrapolado) respecto a los medidos in situ.	56
4.7. Tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T30 extrapolado).	59
4.8. Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T30 extrapolado) respecto a los medidos in situ.	59
4.9. Tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T30 extrapolado).	61
4.10. Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T30 extrapolado) respecto a los medidos in situ.	61
5.1. Coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en el centro. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2. .	76
5.2. Coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en la esquina. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2. .	77
5.3. Coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en el centro. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2. .	78
5.4. Coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en la esquina. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2. .	79
5.5. Comparación de cálculos de coeficientes mediante ajuste de curvas y mediante ecuaciones obtenidas con el programa Eureqa para el aula EP/0-26M con factor de escala 2.6 y fuente en la esquina.	85

5.6. Comparación de cálculos de coeficientes mediante ajuste de curvas y mediante ecuaciones obtenidas con el programa Eureqa para el aula EP/0-26M con factor de escala 2.6 y fuente en el centro.	85
B.1. Resultados con el aula OP/S003 sin mobiliario simulada con EASE.	110
B.2. Resultados con el aula EP/0-26M sin mobiliario simulada con EASE.	111

Índice de Códigos

2.1. Función Matlab para obtener cualquier fracción n de bandas de frecuencia del espectro audible.	13
4.1. Líneas de código Matlab para obtener coeficientes de la teoría revisada corregida del campo directo.	66
4.2. Líneas de código Matlab para obtener coeficientes de la teoría revisada corregida del campo tardío.	66
4.3. Líneas de código Matlab para obtener coeficientes de la teoría revisada corregida del campo temprano.	66
A.1. Líneas de código Matlab para introducir párametros para el archivo con medidas de dBFA.	107

1. Introducción

La acústica desde un punto de vista físico y de las primeras experimentaciones comenzó principalmente en el siglo XVII, desde aquellas primeras contribuciones hasta hoy el campo de conocimiento de la acústica ha crecido exponencialmente. La acústica engloba decenas de ramas de conocimiento diferentes entre las que destacan:

- Acústica arquitectónica (rama de este trabajo).
- Acústica ambiental.
- Electroacústica.
- Acústica submarina.
- Vibroacústica.
- Psicoacústica.
- Acústica fisiológica.
- Acústica fonética.

Existen muchas más ramas y algunas de ellas engloban otras ramas de conocimiento. La historia nos ha dejado grandes estudios y experimentos valiosos para forjar una gran base de conocimiento, en el punto siguiente se muestra una cronología resumida de algunos autores que dieron pasos para comprender mejor el apasionante mundo de la acústica.

1.1. Cronología de la acústica

La historia nos ha dado grandes nombres en el campo de acústica, los principales autores son¹:

Galileo Galilei (1564-1642): Es considerado el precursor de la acústica moderna, sus aportaciones al campo de la acústica se basaron en el comportamiento y emisión de sonido de una cuerda dependiendo de sus parámetros físicos, las ondas estacionarias en cuerdas y la resonancia al excitarse una cuerda por efecto de otra.

Marin Mersenne (1588-1648): Aunque se considere a Galileo como el precursor de la acústica moderna, Marin fue un monje que realizó multitud de experimentos y estudios de gran calado por los que él es técnicamente el verdadero precursor de la acústica moderna. Determinó la frecuencia de distintas notas musicales y fue el primer autor en investigar la velocidad del sonido aunque no con mucho éxito.

¹La mayoría de los datos de la cronología fueron recabados por Antonio Durá Domenech para su libro *Temas de acústica* publicado por la Universidad de Alicante en 2005

Athanasius Kircher (1602-1680): Consiguió demostrar que el sonido no se propaga en el vacío o, el altavoz trompeta que no es más que un amplificador mecánico del sonido. También estudió el efecto de la geometría de un recinto en la focalización del sonido.

Robert Hooke (1635-1703): En colaboración con Robert Boyle (1627-1691) fueron los inventores del estetoscopio y de la rueda giratoria dentada utilizada para producir tonos de frecuencia conocida.

Joseph Sauveur (1653-1716): Se le atribuye ser el primero en utilizar la palabra *acústica* para hablar de la ciencia del sonido. Fue el primero en observar, en cuerdas vibrantes, que en una misma vibración se podían encontrar diferentes frecuencias (armónicos).

Giovanni L. Bianconi (1717-1781): Realizó mediciones de la velocidad del sonido en invierno y en verano descubriendo que la velocidad del sonido dependía de la temperatura.

Felix Savart (1791-1841): Midió las frecuencias exactas de las notas musicales y fue el primero en analizar el umbral de audición humano.

Ernst F.F. Chladni (1756-1824): Fue el primero en experimentar con placas vibrantes con arena visualizando los nodos y vientres que se producían, aunque no supo explicar la razón, fue Lord Rayleigh a finales del siglo XIX quien dio con la solución analítica.

Jean-Daniel Colladon (1802-1893): Junto al matemático Charles F. Sturm (1802-1855) consiguieron medir la velocidad del sonido en el agua con gran precisión.

Karl R. Koenig (1832-1901): Realizó los estudios más prolíficos sobre la audición humana desarrollando para ello diferentes fuentes calibradas como diapasones, barras, etc.

Karl F. Braun (1850-1918): Inventó el tubo de rayos catódicos, base de los osciloscopios, con los cuales era posible *visualizar* el sonido.

August A.E. Kundt (1839-1894): Utilizaba tubos de vidrios para observar las ondas estacionarias que se producían dentro de ellos, gracias a su investigación (Kundt, 1866) hoy en día se utiliza el *tubo de Kundt* para experimentación y también para la medición de impedancia acústica de los materiales.

Hermann L. von Helmholtz (1821-1894): Fue el primero en elaborar una teoría detallada sobre el mecanismo de audición, llamada teoría de la resonancia. Estos estudios le permitieron tiempo después diseñar resonadores que absorbían sonido de frecuencias concretas, dispositivos que heredaron su nombre.

John William Strutt (1842-1919): También conocido por su título nobiliario *Lord Rayleigh*, en sus experimentos siempre buscaba un desarrollo matemático para comparar si experimentalmente se verificaba la teoría. Hizo cientos de estudios de todo tipo que se encuentran resumidos en su obra *Theory of sound* donde el primer tomo trata sobre la producción del sonido y el segundo sobre la propagación.

Wallace C. Sabine (1868-1919): Se le considera el padre de la acústica arquitectónica. Estudió de forma cuantitativa los factores implicados en la acústica de un recinto. Fue uno de los primeros en obtener un cálculo matemático del tiempo de reverberación.

Éste es un pequeño resumen de algunos autores importantes en el campo de la acústica² hasta principios del siglo XX donde los grandes descubrimientos dejaron paso a los pequeños avances por parte de muchos investigadores.

En el siglo XX y XXI existen grandes investigadores en la rama de la acústica arquitectónica o acústica de recintos entre los que destacan: Carl F. Eyring, Michael Barron, John S. Bradley, Trevor Cox, Peter D'Antonio, Helmut Haas, Vern O. Knudsen, Heinrich Kuttruff, L. Gerald Marshall, Hiroshi Sato, Manfred R. Schroeder, Michael Vorländer y muchos más que se pueden encontrar en la bibliografía de este trabajo.

1.2. Los campos acústicos

Los campos acústicos definen de qué se compone el sonido en un punto concreto del espacio, por ejemplo, si nos encontramos en campo libre (no se produce ninguna reflexión del sonido) y emitimos un sonido, éste se propaga por el espacio como sonido directo o campo directo pero, si existen reflexiones ya no tenemos sólo el campo directo sino que encontramos sonido que ha sido reflejado desde otros puntos del espacio, a este sonido reflejado inicialmente se le denomina campo reverberante.

Hopkins y Stryker (1948) desarrollaron matemáticamente el concepto de campo directo y campo reverberante para que, conociendo ciertos factores de un recinto, se pudiera calcular cuánta *cantidad* de campo directo y cuánta de campo reverberante se encontraría a cierta distancia de una fuente emitiendo sonido.

Esta división entre campo directo y campo reverberante es correcta aunque en la práctica carece de utilidad, debido a que la fisiología del oído humano agrupa el campo directo y algunas de las primeras reflexiones haciendo creer a nuestro cerebro que todo ello constituye un solo sonido. Este concepto fue estudiado por Wallach y cols. (1949) y finalmente desarrollado por Hass (1951), en ambos trabajos se demuestra que hasta cierto tiempo todo el sonido recibido se integra y el cerebro lo procesa como un único sonido sin reflexiones, y además ubica el origen del sonido en el lugar de donde se ha recibido el primer sonido. El tiempo definido por Hass para la comunicación hablada es de 50 milisegundos, es decir, todo sonido (directo y reflejado) hasta transcurridos los 50 milisegundos es integrado por el sistema auditivo humano y entendido como un único sonido, este concepto produjo que se utilizara más convenientemente la nomenclatura de campo directo, campo temprano (engloba todo sonido después del campo directo hasta los 50 ms) y campo reverberante (todo sonido después de los 50 ms).

Como se puede deducir, el campo reverberante definido como el campo comprendido desde los 50 milisegundos, llega después del tiempo en el que el oído humano integra el sonido como uno solo e interfiere en el sonido que se pretendía oír. Es por ello que los campos acústicos se pueden denominar como campo útil (campo directo y campo temprano) y campo perjudicial (campo reverberante desde los 50 ms).

El estudio de la interferencia en la comprensión de la palabra hablada se engloba dentro de la inteligibilidad, donde existen múltiples parámetros para determinar si se tiene mayor o menor inteligibilidad de la palabra, es decir, el grado de dificultad para comprender la palabra

²No se han incluido autores que, si bien parte de sus investigaciones y descubrimientos son utilizados en la acústica, no eran especialistas en el campo de la acústica sino en campos más generales como la física.

hablada. Cuanta más interferencia exista menor posibilidad de comprender la palabra hablada habrá, es importante contrarrestar en la medida de lo posible las interferencias.

Si continuamos con el concepto de campo útil y campo perjudicial entendiendo la importancia de la relación de éstos en la inteligibilidad de la palabra, se puede comprender la importancia de poder calcular matemáticamente los campos de la forma más correcta posible. Actualmente existen multitud de ecuaciones que si bien se aproximan al comportamiento experimental de los campos acústicos no son del todo correctos y por tanto no se pueden utilizar para prever el comportamiento. Los últimos cálculos desarrollados por Barron y Lee (1988) son de los pocos que tienen en cuenta una separación temporal para calcular matemáticamente el campo útil y perjudicial, aunque como se verá en este trabajo estos cálculos no se corresponden con el comportamiento real.

Ante esta problemática se propone un cálculo modificado de los campos, basado en las ecuaciones de Barron y Lee e inspirado en la búsqueda de un ajuste en el cálculo de Sato y Bradley (2008) donde, a partir de una serie de medidas experimentales o mediante modelos acústicos, se comparan con el cálculo teórico de los campos útil y perjudicial y se buscan coeficientes de ajuste para obtener finalmente un cálculo teórico válido relacionando los coeficientes obtenidos con las características del recinto.

2. Marco Teórico

Históricamente se ha tomado en consideración el campo directo como aquel sonido que es recibido directamente desde la fuente y, todo aquel que haya sufrido alguna reflexión, se considera campo reverberante. En el sentido estricto, este concepto teórico sería correcto, pero se ha demostrado experimentalmente que la fisiología del oído humano percibe como un único sonido aquellos sonidos que tengan una diferencia temporal menor a 50ms, ubicándolo en el lugar de origen del primer sonido. Este concepto se denomina *efecto de precedencia* definido por Wallach y cols. (1949) y desarrollado completamente por Hass (1951), estudio por el cual el *efecto de precedencia* también se denomina *efecto Hass*.

Teniendo en consideración el efecto Hass los campos acústicos se pueden dividir en lo que se denomina *campo útil* y *campo perjudicial*, el primero incluye el campo directo y las primeras reflexiones hasta el rango temporal deseado (para palabra 50 milisegundos) y el segundo campo es todo aquel sonido recibido después del rango temporal (interfiere con la inteligibilidad del habla que se encuentra en el campo útil).

Si utilizamos este concepto para redefinir los campos acústicos, podemos tener una teoría más ajustada al fisiología del oído humano, lo que se denomina *teoría revisada*, término acuñado por Barron y Lee (1988) y ampliado en Barron (2015). Esta *teoría revisada* está concebida para recintos para música, por ello utilizan el rango temporal de 80 ms, para el objeto de este trabajo, recintos para palabra, el rango temporal utilizado es de 50 ms.

Esta *teoría revisada* permite calcular el *campo útil* y *campo perjudicial* para predecir las pendientes de los campos respecto a la distancia emisor-receptor, aunque produce un margen de error demasiado grande para dar por válidos los cálculos, es por ello que Sato y Bradley (2008) decidieron incluir factores de corrección en los cálculos para obtener un menor error. A la introducción de factores de corrección y otros ajustes se le va a denominar *teoría revisada corregida* de aquí en adelante.

En los apartados siguientes se definen conceptos utilizados en este trabajo y los conceptos necesarios para finalmente comprender la *teoría revisada corregida*.

2.1. Parámetros básicos

En este apartado se van a definir los conceptos básicos del sonido y la acústica, el concepto de *nivel*, *presión acústica*, etc.

2.1.1. Directividad

La directividad es la relación entre la presión acústica emitida en una dirección dada y la presión acústica máxima que puede emitir la fuente. Se designa con la letra D y es adimensional. Se utiliza para realizar los diagramas de directividad.

$$D(\theta) = \frac{p_{ef}^2(\theta)}{p_{max}^2} \quad (2.1)$$

Habitualmente se expresa en escala logarítmica, permitiendo así visualizar más fácilmente la información, donde 0 dB es el valor de la máxima presión y según se reduce esta presión el valor de decibelios será negativo. Así con una simple resta se puede conocer el nivel de presión emitido en un ángulo concreto.

$$D_{dB} = 10 \log_{10} D \quad (2.2)$$

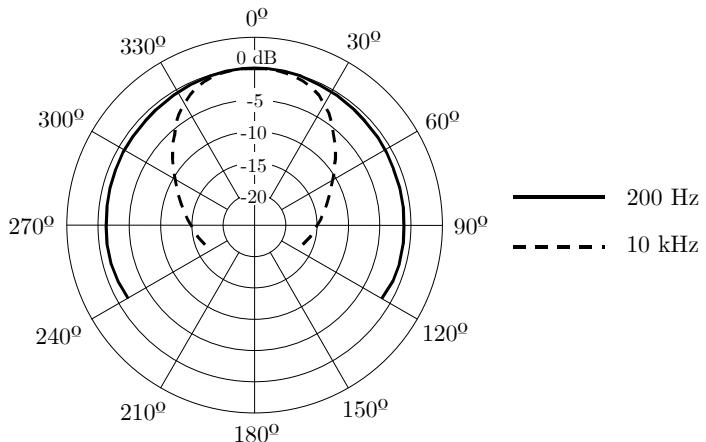


Figura 2.1: Diagrama de directividad de un altavoz de dos vías. Se representa la directividad emitiendo dos frecuencias diferentes.

2.1.2. Factor e índice de directividad

En ocasiones es útil tener un único valor, *factor de directividad* o Q , que represente la directividad que tiene una fuente, sobretodo en cálculos donde se tenga en cuenta la directividad de la fuente pero no sea relevante el nivel en cada ángulo de emisión. Este valor es la relación entre la intensidad acústica (2.1.4) emitida en la dirección de máxima emisión y la que emitiría una fuente isótropa (omnidireccional) a igual potencia acústica.

$$Q_0 = \frac{I(\theta_0, \Psi_0)}{I_{ISO}}$$

La mayoría de ocasiones, la directividad no es homogénea como sí lo es en la figura 2.1 y para calcular un único valor hay que integrar los valores de intensidad en los diferentes ángulos de emisión:

$$Q = \frac{4\pi I(\theta_0, \Psi_0)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin(\theta) I(\theta, \Psi) d\Psi d\theta}$$

Que teniendo en cuenta la simetría de revolución y desarrollando, el cálculo del factor de directividad se obtiene mediante:

$$Q = \frac{2}{\sum_{i=1}^n \frac{I(\theta_i)}{I(\theta_0)} \sin(\theta_i) \Delta\theta_i} \quad (2.3)$$

Donde: $I(\theta_0)$ → Es la intensidad en la dirección de máxima emisión.

n → Es el número de ángulos donde se tiene el valor de la intensidad.

$\Delta\theta$ → Es la distancia en grados entre el ángulo i y el ángulo $i + 1$.

En este trabajo se utilizará una fuente omnidireccional, por lo que tiene un factor de directividad $Q = 1$, pero se debe tener en cuenta que esta directividad puede verse modificada por la posición de la fuente respecto al suelo, paredes o techo, tal como se muestra a continuación:

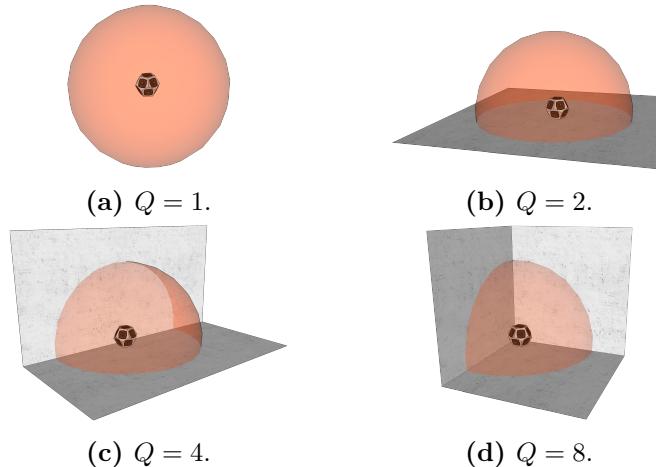


Figura 2.2: Modificación del factor de directividad producido por uno o varios planos.

El índice de directividad determina cuántos decibelios aumenta la intensidad en el eje de máxima radiación respecto a una fuente omnidireccional, se calcula:

$$DI = 10 \log_{10} Q \quad (2.4)$$

2.1.3. Potencia acústica

La potencia acústica, representada por la letra W , describe la energía por unidad de tiempo que emite una fuente acústica. Es un valor intrínseco de cada fuente, es decir, no depende de

las condiciones físicas del medio o la distancia, se mantiene constante. Las unidades de este parámetro son los vatios (W) o los julios por segundo (J/s).

2.1.4. Intensidad acústica

La intensidad acústica se define como la potencia acústica por unidad de superficie, se representa con la letra I y sus unidades son los W/m^2 .

$$I = \frac{W}{S} \quad (2.5)$$

2.1.5. Presión acústica

Es la variación de presión local sobre la presión absoluta o atmosférica producida por las ondas acústicas, se representa con la letra p y sus unidades son los pascales. La suma neta resultante es igual a la presión absoluta.

Utilizando un símil sencillo como es un muelle se pueden comprender estas variaciones locales de presión:

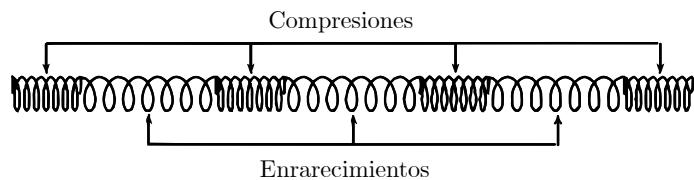


Figura 2.3: Compresión y enrarecimiento de un muelle como ejemplo de la variación de presión producida por ondas acústicas.

2.1.6. Divergencia esférica

Éste es un concepto físico necesario para comprender cómo evoluciona la intensidad acústica (2.1.4) emitida por una fuente omnidireccional. La divergencia esférica describe cómo se distribuye la energía acústica emitida omnidireccionalmente en el espacio.

Una fuente acústica omnidireccional emite uniformemente intensidad en todas las direcciones, es decir, se propaga esféricamente. Según transcurre el tiempo la intensidad recorre más distancia y la esfera aumenta de tamaño distribuyendo la intensidad en una superficie aún mayor, esto se puede calcular como:

$$I = \frac{W}{S} \quad (2.6)$$

Donde: $W \rightarrow$ Es la potencia acústica de la fuente en vatios.

$I \rightarrow$ Es la intensidad recibida a una distancia r en metros.

$S = 4\pi r^2$, es la superficie de una esfera de radio r .

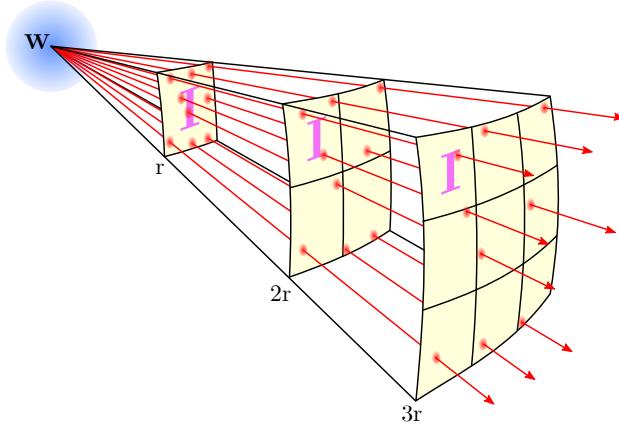


Figura 2.4: Representación gráfica de la divergencia esférica respecto a la distancia. Autor de la figura original: *Borb*, de Wikipedia.

Si se tiene el valor de la intensidad a una distancia r_1 y se desea conocer el valor de intensidad a una distancia r_2 de la primera se puede utilizar lo que se denomina *ley de la inversa del cuadrado de la distancia* que no es más que una derivación de la ecuación de la divergencia esférica.

$$I_2 = \frac{r_1^2}{r_2^2} I_1 \quad (2.7)$$

Si la fuente tiene factor de directividad distinto a 1 (omnidireccional) se puede calcular la intensidad incluyendo el factor:

$$I = \frac{WQ}{S} \quad (2.8)$$

Donde: $Q \rightarrow$ Es el factor de directividad de la fuente.

2.1.7. Divergencia cilíndrica

El concepto es el mismo que el de la divergencia esférica pero en este caso la intensidad en lugar de propagarse sobre la superficie de una esfera lo hace sobre la superficie lateral de un cilindro. Este tipo de divergencia se obtiene con fuentes lineales aunque mediante guías de ondas o alineando varias fuentes es posible modificar un frente de ondas de esférico a cilíndrico.

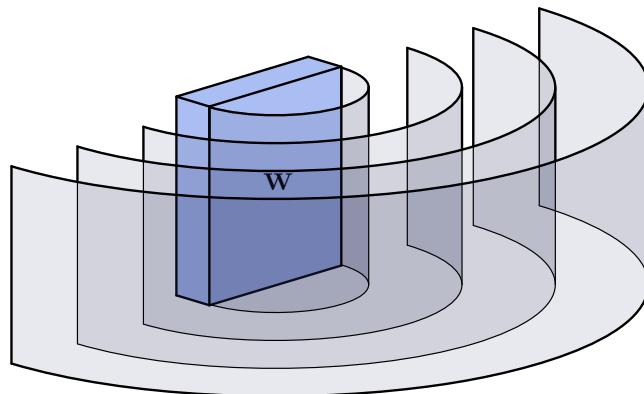


Figura 2.5: Representación gráfica de la divergencia cilíndrica respecto a la distancia.

El cálculo es el mismo que con la divergencia esférica pero teniendo en cuenta que ahora el área es el de un cilindro:

$$I = \frac{W}{S} \quad (2.9)$$

Donde: $S = 2\pi rh$, es la superficie de un cilindro de radio r y altura h .

2.1.8. Densidad del aire

Una densidad es la relación entre la masa y el volumen, se representa con la letra ρ y sus unidades son los Kg/m^3 . Para el caso del aire se puede calcular de forma simplificada como:

$$\rho = \frac{p}{R_{especfica}T} \quad (2.10)$$

Donde: p → Es la presión atmosférica en pascales, 101.325 kPa.

$R_{especfica}$ → Es la constante específica del aire en $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$, para el aire seco

$$R_{especfica} = 287.058.$$

T → Es la temperatura en kelvin. $T = 273.15 + {}^{\circ}C$.

2.1.9. Velocidad del sonido en el aire

La velocidad del sonido se representa con la letra c y sus unidades son los m/s . Esta velocidad depende de la temperatura, la presión y la humedad, pero simplificando se puede calcular como:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2.11)$$

Donde: γ → Es el coeficiente de dilatación adiabática del aire, para el aire seco $\gamma = 1.4$.

R → Es la constante universal de los gases, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

T → Es la temperatura en kelvin. $T = 273.15 + {}^\circ\text{C}$.

M → Es la masa molar del aire, 0.029 kg/mol .

2.1.10. Impedancia acústica específica del aire

La impedancia acústica específica del aire es la oposición al flujo de energía acústica del aire, se representa con la letra Z y sus unidades son $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$ o *rayl*¹.

Esta impedancia se calcula mediante la densidad del aire ρ y la velocidad del sonido c .

$$Z = \rho c \quad (2.12)$$

2.1.11. Escala logarítmica

Los valores de presión, potencia o intensidad acústica sufren grandes variaciones por lo que para trabajar con ellos fácilmente se recurre a la escala logarítmica, a continuación se muestra la conversión de lineal a escala logarítmica de la presión, potencia e intensidad acústica, todos ellos son adimensionales y sus unidades son los decibelios o *dB*.

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{ef}^2}{p_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{ef}}{p_0} \right) \quad (2.13)$$

$$L_W = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.14)$$

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.15)$$

Donde: p_0 → Es la presión de referencia, $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

W_0 → Es la potencia de referencia, 1 pW o 10^{-12} W .

I_0 → Es la intensidad de referencia, $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$.

El nivel de presión acústica L_p también se suele nombrar como SPL (*sound pressure level*) y el nivel de potencia como SWL.

De igual modo, si se tienen estos valores en escala logarítmica y se quiere trabajar con ellos en escala lineal, la conversión es la siguiente²:

¹La unidad *rayl* se llama así en honor al físico John William Strutt, también conocido como Lord Rayleigh o John Rayleigh.

²Es una simple resolución matemática pero debido a múltiples errores encontrados en la literatura se ha decidido desarrollarlo.

$$p = 10^{\frac{L_p}{20}} p_0 \quad (2.16)$$

$$W = 10^{\frac{L_W}{10}} W_0 \quad (2.17)$$

$$I = 10^{\frac{L_I}{10}} I_0 \quad (2.18)$$

2.1.12. Relación entre presión y potencia o intensidad acústica

Teniendo en cuenta ciertos parámetros se puede relacionar fácilmente el concepto de potencia, intensidad y presión acústica.

Si se conoce la presión acústica a una distancia r de la fuente, la potencia acústica resultante será:

$$W = \frac{p_{ef}^2 4\pi r^2}{Z} \quad (2.19)$$

Donde: p_{ef} → Es la presión acústica eficaz, es la que mide cualquier sonómetro.

Siguiendo el caso en el que se conoce la presión acústica, se puede calcular la intensidad acústica con:

$$I = \frac{p_{ef}^2}{Z} \quad (2.20)$$

Para los casos en los que se esté trabajando en escala logarítmica los cálculos para la potencia son:

$$L_W = L_p + 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi r^2}{Z} \right) \quad (2.21)$$

$$L_W \approx L_p + 20 \log_{10} r + 11 ; \quad \text{sí} \quad Q = 1 \quad (2.22)$$

2.1.13. Bandas de frecuencia

Las bandas de frecuencia son las fracciones en las que se divide el espectro audible (mínimo entre 20 Hz y 20000 Hz) de un sonido, se caracterizan por tener una frecuencia límite inferior f_i , otra superior f_s y una central f_c . El punto de referencia para el cálculo del resto de frecuencias es la frecuencia central de 1000 Hz.

Las bandas de frecuencia en el espectro audible más habituales son las denominadas bandas de octava, entre una frecuencia central y la siguiente la relación es el doble y la relación entre sus límites y central es:

$$f_c = \sqrt{2} f_i$$

$$f_s = 2 f_i$$

Otras bandas de frecuencia habituales son los tercios de octava donde las relaciones entre frecuencias centrales cumplen $2^{1/3}$, por lo que se puede observar que tres tercios dan como resultado una octava. Sus relaciones son las siguientes:

$$f_c = \sqrt[6]{2} f_i$$

$$f_s = \sqrt[3]{2} f_i$$

Bandas de octava (Hz)									
31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

Tabla 2.1: Frecuencias centrales para las bandas de octava más utilizadas (ISO 266:1997).

Se han desarrollado unas líneas de código Matlab para crear fácilmente cualquier fracción de bandas de frecuencia (octava: $n = 1$, tercios de octava $n = 3$, sextos de octava $n = 6$, etc):

Código 2.1: Función Matlab para obtener cualquier fracción n de bandas de frecuencia del espectro audible.

```

FrecCentral = 10^3 * (2 .^ ((-6*n:4*n+n/3)/n)); % Vector de frecuencias centrales 1/n octavas
FrecDist = 2^(1/(2*n)); % Distancia entre central y corte superior o inferior
FrecSup = FrecCentral .* FrecDist; % Frecuencias límite superior
FrecInf = FrecCentral ./ FrecDist; % Frecuencias límite inferior

```

2.1.14. Ponderación A

El oído humano no percibe todas las frecuencias por igual tal como demostraron Fletcher y Munson (1933), por ello es necesario ponderar el nivel de presión de cada banda de frecuencia (octavas, tercios de octava, ...) para representar correctamente cómo lo percibirá el oído humano. La ponderación A corresponde a la inversa de la curva de 40 fons de las curvas Fletcher-Munson.

Existen múltiples tablas en la literatura que definen el valor de corrección para cada banda de frecuencia, pero es preferible utilizar la función (obtenida mediante regresión y establecida en IEC 61672-1:2013) con la que se obtienen estos valores para cualquier frecuencia f :

$$A(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{12194^2 f^4}{(f^2 + 20.6^2) \sqrt{(f^2 + 107.7^2)(f^2 + 737.9^2)(f^2 + 12194^2)}} \right) + 2.0 \quad (2.23)$$

La ponderación se aplica sumando esta al nivel de presión de la banda de frecuencia f .

2.1.15. Suma de niveles

En ocasiones es necesario sumar los niveles en decibelios de varias fuentes o sumar el nivel obtenido en lineal para pasarlo a bandas de octava, tercios de octava o a nivel global, para ello la suma se realiza del siguiente modo:

$$L_{sum} = 10 \log_{10} \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10} \right) \quad (2.24)$$

Donde: $L_1, L_2, L_n \rightarrow$ Son los n niveles en dB a sumar.

Por ejemplo, para el paso de tercios de octava a bandas de octava la suma para obtener el valor en la banda de octava de 125 Hz será:

$$L_{125Hz} = 10 \log_{10} \left(10^{L_{100Hz}/10} + 10^{L_{125Hz}/10} + 10^{L_{160Hz}/10} \right)$$

2.1.16. Ruido rosa/blanco

En la mayoría de mediciones para conocer principalmente la respuesta en frecuencia de los elementos de emisión, captación o recintos, se emiten señales como el ruido blanco o el ruido rosa.

El ruido blanco se caracteriza por ser una señal con el mismo nivel en todas las frecuencias produciendo, cuando se traslada a bandas de octava, que haya un incremento de 3dB por octava dado que cada octava tiene el doble de ancho de banda que la anterior y por tanto se suma el doble de energía ($10 \log_{10}(2) = 3dB$).

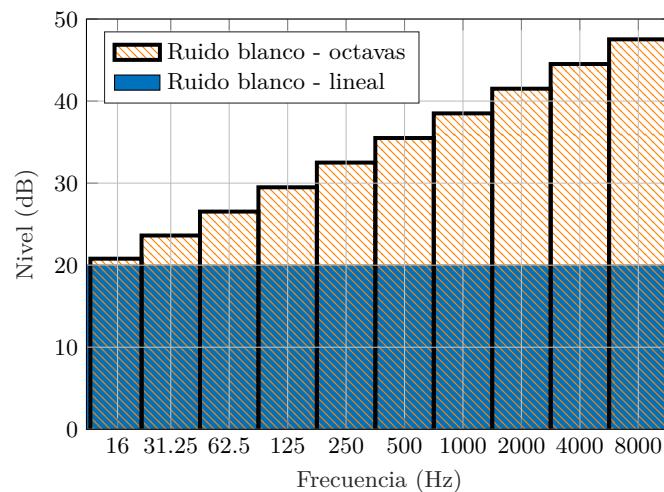


Figura 2.6: Representación de ruido blanco tanto en lineal como por octavas.

El ruido rosa corrige el efecto producido en el ruido blanco, introduciendo una atenuación de 3dB por octava, es por ello por lo que es el ruido más habitual en mediciones que se analizan por bandas de octava, ya que mantiene el mismo valor de energía en todas las bandas de octava.

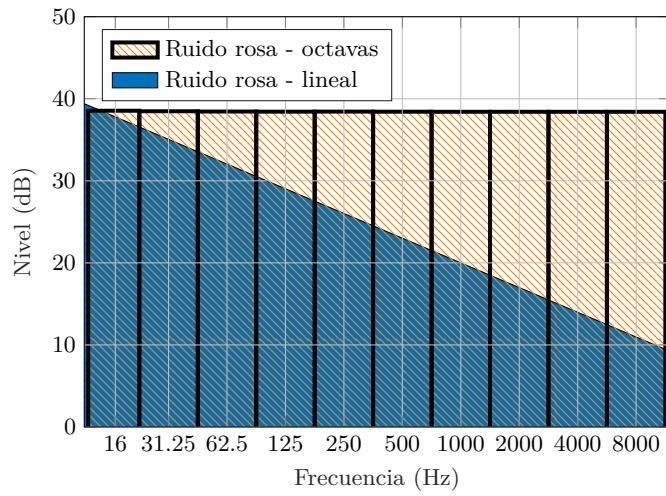


Figura 2.7: Representación de ruido rosa tanto en lineal como por octavas.

2.1.17. Nivel continuo equivalente

El nivel continuo equivalente es la media energética del nivel de un ruido o sonido promediado en el tiempo, es básicamente un nivel promedio de una medida continua. Debido a la alta variabilidad de nivel de un sonido no es correcto escoger un valor de un instante concreto, se debe obtener un promedio de todos los valores instantáneos obtenidos.

Este nivel se puede calcular como:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p^2(t)}{p_0^2} \right) dt \right) \quad (2.25)$$

Donde: $p^2(t) \rightarrow$ Son los valores instantáneos de presión al cuadrado.

$T \rightarrow$ Es la duración de la medida.

Para entenderlo fácilmente se muestra en la figura 2.8 una señal captada y su valor L_{eq} .

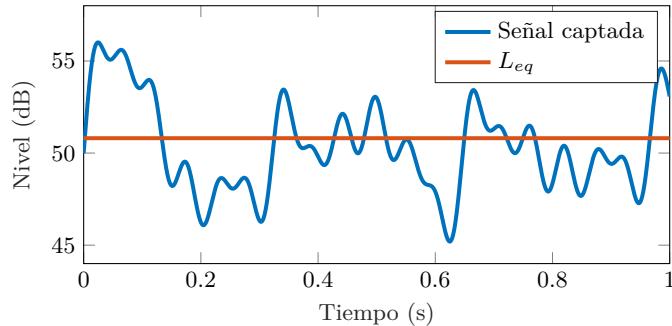


Figura 2.8: Representación de señal captada y su L_{eq} .

En ocasiones los equipos, como sonómetros, ofrecen valores de L_{eq} para un intervalo de tiempo determinado T y en incrementos de Δt , para calcular el nivel continuo equivalente para todo el intervalo temporal de medida se puede utilizar:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \Delta t_i 10^{L_{eq_i}/10} \right) \quad (2.26)$$

2.2. Parámetros de acústica de recintos

Son todos aquellos parámetros donde no actúa directamente ni el emisor ni el receptor pero sí las características del recinto. Se basa principalmente en la acústica geométrica 2.2.1.

2.2.1. Acústica geométrica

La acústica geométrica sustituye la propagación del sonido por medio de ondas a una propagación por medio de rayos emitidos desde la fuente, del mismo modo que en la óptica geométrica. Esto simplifica mucho los cálculos de propagación en recintos. La acústica geométrica asume los siguientes aspectos:

- La reflexión del sonido es especular.
- La longitud de onda del sonido a analizar ($\lambda = c/f$) debe ser pequeña respecto a las dimensiones y obstáculos del recinto, si no es así se producirían fenómenos de difracción.
- Las dimensiones del relieve o rugosidad de las superficies del recinto y de los obstáculos deben ser inferiores a la longitud de onda del sonido a analizar, en caso contrario el sonido se reflejaría de forma difusa.

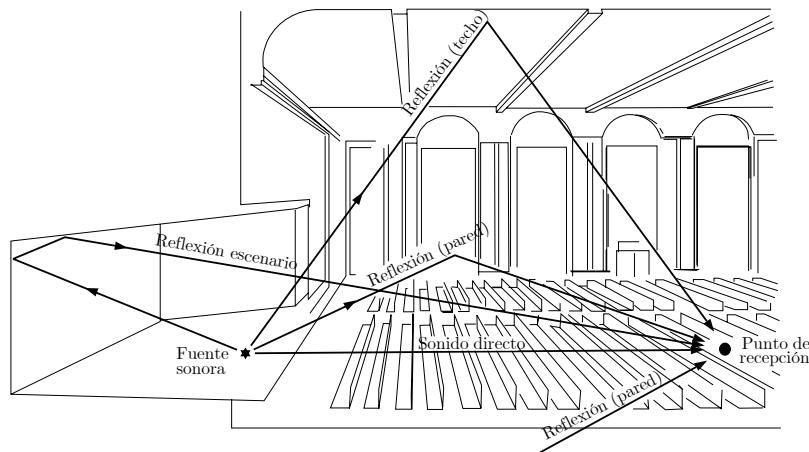


Figura 2.9: Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor. Figura extraída y modificada de Carrión (1998), pág. 51.

2.2.2. Modos propios

Las ondas acústicas al reflejarse producen interferencias entre las ondas incidentes y las ondas reflejadas, estas interferencias pueden ser destructivas, reduciendo el nivel de presión acústica o constructivas, aumentando el nivel. Esto es parte de la acústica ondulatoria.

Este efecto, que se produce en posiciones y frecuencias concretas dentro de un recinto, se denomina modos propios. Para facilitar su comprensión se muestra en la figura 2.10 una onda incidente, la onda reflejada y el resultado frente a la distancia. Esto demuestra que es posible tener niveles menores o mayores de lo esperado en algunas posiciones de un recinto.

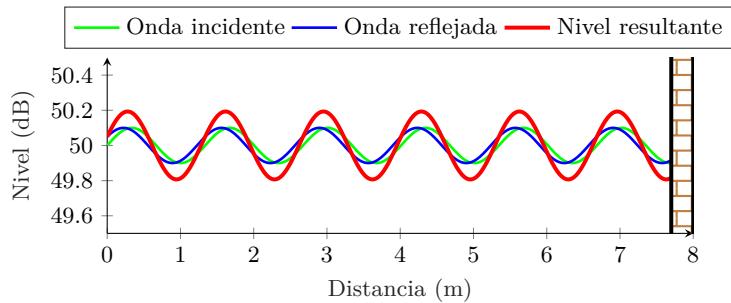


Figura 2.10: Ejemplo básico de interferencia de ondas (100 Hz) en dos dimensiones frente a la distancia.

Los modos propios varían según las dimensiones del recinto, es por ello por lo que se denomina *propio* pues cada recinto producirá unos modos.

Es posible calcular las frecuencias que van a producir un modo propio para un recinto rectangular con:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (2.27)$$

Donde: $n_x, n_y, n_z \rightarrow$ Son los índices para cada modo propio. 0,1,2,3,...

$L_x, L_y, L_z \rightarrow$ Son las dimensiones del recinto, largo, ancho y alto en metros.

$c \rightarrow$ Es la velocidad del sonido en el aire.

Los modos propios en un recinto rectangular pueden ser:

Axiales: Son los modos producidos entre dos superficies (techo y suelo, pared izquierda y pared derecha, pared frontal y posterior). Las combinaciones de índices pueden ser: $(n_x, 0, 0)$; $(0, n_y, 0)$; $(0, 0, n_z)$.

Tangenciales: Son los modos producidos entre cuatro superficies, es decir, entre aristas enfrentadas (suelo+pared izquierda y techo+pared derecha, ...). Las combinaciones de índices pueden ser: $(n_x, n_y, 0)$; $(n_x, 0, n_z)$; $(0, n_y, n_z)$.

Oblicuos: Son los modos producidos entre seis superficies, es decir, vértices enfrentados. Las combinaciones de índices pueden ser: (n_x, n_y, n_z) .

La diferencia de nivel en distintas posiciones se va reduciendo cuando la densidad modal (número de modos en una frecuencia o banda de frecuencia) aumenta, llegando a ser imperceptible. El cálculo de la densidad modal desde 0 a una frecuencia determinada por Morse y Ingard (1968) se obtiene como:

$$Dn(f) = \frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f^2}{4c^2} + \frac{L f}{8c} \quad (2.28)$$

Donde: $V \rightarrow$ Es el volumen del recinto en m^3 .

$S \rightarrow$ Es la superficie del recinto en m^2 .

$L \rightarrow$ Es el perímetro del recinto en m .

$f \rightarrow$ Es la frecuencia límite para el cálculo.

Derivando esta ecuación como indica Mankovsky (1971) se puede obtener la densidad modal para una frecuencia concreta:

$$Dn(f_i) = \frac{4\pi V f_i^2}{3c^3} + \frac{\pi S f_i}{4c^2} + \frac{L}{8c} \quad (2.29)$$

Se puede obtener una aproximación de la densidad modal en una banda de octava o tercio de octava completa mediante:

$$Dn(f_i, \Delta f_i) = \left(\frac{4\pi V f_i^2}{3c^3} + \frac{\pi S f_i}{4c^2} + \frac{L}{8c} \right) \Delta f_i \quad (2.30)$$

Donde: $f_i \rightarrow$ Es la frecuencia central de la banda.

$\Delta f_i \rightarrow$ Es el ancho de la banda.

Es posible conocer a partir de que frecuencia la respuesta modal no será apreciable por una persona (debido al número de modos que contiene) y por tanto más allá de esa frecuencia no tiene importancia estudiar la respuesta modal. El cálculo, definido por Schroeder (1954), tenía en cuenta a partir de qué frecuencia se producían mínimo 10 modos en todas las bandas y revisado en Schroeder (1962) donde aclaró que era suficiente con 3 modos. Debido al estudio de Schroeder la ecuación recibió el nombre de *frecuencia de Schroeder* también conocida como frecuencia límite o de cruce:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.31)$$

Donde: $T \rightarrow$ Es el tiempo medio de reverberación (entre 500 Hz y 1 KHz) en segundos.

$V \rightarrow$ Es el volumen del recinto en m^3 .

2.2.3. Coeficiente de absorción medio

La absorción acústica es la disipación de la energía acústica al paso de ésta por un material. Los materiales absorbentes son diseñados para producir esta disipación a ciertas frecuencias sobre las que se desea actuar. Debido a que el propósito de este trabajo no es profundizar en

el funcionamiento y diseño de estos materiales, si se tiene interés se recomienda la lectura de Cox y D'Antonio (2016), donde se desarrollan todos los conceptos sobre los materiales para el acondicionamiento acústico de recintos.

El coeficiente de absorción de los materiales se suele ofrecer u obtener por bandas de frecuencia, pero en algunos cálculos es necesario un coeficiente global, en el documento DB-HR del Código Técnico de la Edificación (*sección 3.2*) se indica que este coeficiente se obtiene realizando el promedio del coeficiente de absorción en las bandas de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz (ecuación 2.32). Estos coeficientes no tienen unidades y comprenden un valor entre 0 y 1, donde 0 es reflexión total y 1 es la absorción total.

$$\alpha_{mid} = \frac{\alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{3} \quad (2.32)$$

2.2.4. Absorción acústica

Para los cálculos acústicos, en ocasiones, se utiliza el valor de absorción total o equivalente del recinto; éste se calcula como la suma de las áreas de absorción por su coeficiente de absorción (medio o por bandas). Las unidades de absorción son los m^2 .

$$A_T = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i \quad (2.33)$$

Donde: S_i → Es la superficie del material i en m^2 .

α_i → Es el coeficiente de absorción del material i , no tiene unidades. El valor se encuentra entre 0 y 1.

2.2.5. Constante del recinto

La constante del recinto es un valor que relaciona la absorción media de las superficies del recinto y el área. Se representa con las letras Rc provenientes de *room constant* y sus unidades son los m^2 .

$$Rc = \frac{A_T}{1 - \bar{\alpha}} \quad (2.34)$$

Donde: $\bar{\alpha} = A_T/S$, es el coeficiente medio de absorción, no confundir con coeficiente de absorción medio (2.2.3).

S → Es el área total de todas las superficies.

2.2.6. Camino libre medio en acústica

El camino libre medio (en inglés *mean free path*) o MFP aplicado a la acústica geométrica, describe la distancia media que recorre el sonido entre una reflexión y otra. Jäger (1911)

propuso utilizar una modificación de la teoría cinética de los gases (Bernoulli, 1738, cap. 10), obteniendo así el valor del camino libre medio para ondas acústicas como:

$$\text{MFP} = 4 \frac{V}{S} \quad (2.35)$$

Donde: $V \rightarrow$ Es el volumen del recinto en m^3 .

$S \rightarrow$ Es la suma del área de todas las superficies del recinto en m^2 .

Jäger demostró teóricamente que este valor para MFP es válido para cualquier factor de forma de recinto en el supuesto de que la distribución de energía acústica sea uniforme. Años más tarde, Schuster y Waetzmann (1929) y Eyring (1930) obtuvieron otros valores de MFP para recintos con factores de forma muy concretos:

$$\text{Cubo} \rightarrow \text{MFP} = 2\sqrt{3} \frac{V}{S}$$

$$\text{Cilindro (altura=diámetro)} \rightarrow \text{MFP} = 3\sqrt{2} \frac{V}{S}$$

$$\text{Esfera} \rightarrow \text{MFP} = \text{diámetro} = 6 \frac{V}{S}$$

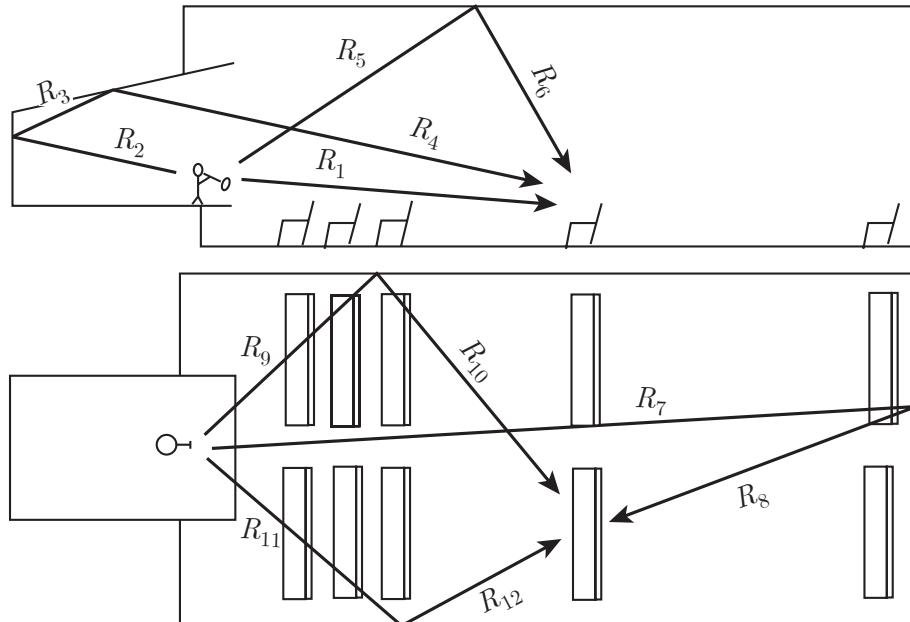
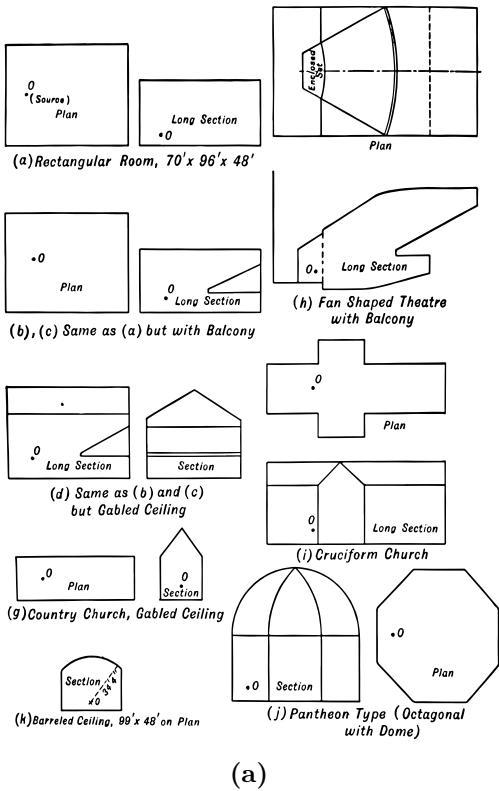


Figura 2.11: Trazado de rayos para calcular el camino libre medio (promedio de R_i). Figura extraída y modificada de Self y cols. (2009), pág. 109.

Poco después, Knudsen (1932) demostró empíricamente (figuras 2.12a y 2.12b) que el valor de MFP propuesto por Jäger no es excesivamente dependiente del factor de forma del recinto.

Lo realizó emitiendo rayos lumínicos simulando la emisión de una fuente acústica sobre varios modelos de auditorios a escala, promediando la longitud entre reflexión y reflexión de estos rayos; determinó que el valor $4V/S$ es una buena aproximación del camino libre medio.



(a)

Type of Auditorium	V cubic feet	S square feet	Mean Free Path, feet	$\frac{4V}{S}$	k	Comments on Distribution of Reflections
(a) Rectangular, 70 ft. by 96 ft. by 48 ft., no balcony.....	322,600	29,400	44.0	43.7	0.049	Probability of reflections from ceiling and floor about 10 per cent greater than from walls
(b) Same as (a) but with balcony, regarding balcony opening as a reflecting surface.....	223,000	24,600	36.2	36.4	.049	
(c) Same as (b) but regarding space under balcony as part of a single cavity.....	284,000	32,600	35.6	34.8	.050	
(d) Same as (c) but with gabled ceiling.....	338,000	34,800	39.8	38.8	.050	
(e) Cube, 70 ft. by 70 ft. by 70 ft.....	343,000	29,400	48.4	46.6	.051	
(f) Office room 48 ft. by 39 ft., 4 in. by 11 ft., 8 in.....	17,600	4,860	13.6	14.5	.046	
(g) Country church 96 ft. by 32 ft. on plan, 50 ft. to top of gabled ceiling.....	127,000	16,600	30.8	30.6	.049	
(h) Fan-shaped theatre, with balcony.....	470,000	46,300	40.6	40.6	.049	
(i) Cruciform church (naisle or trusses).....	354,000	36,400	42.0	38.9	.053	
(j) Pantheon type, with domed ceiling.....	690,000	41,500	69.6	66.5	.051	
(k) Barreled ceiling, 99 ft. by 48 ft., on plan.....	172,000	19,300	34.7	35.6	.048	

(b)

Figura 2.12: a) Modelos utilizados para el cálculo de MFP por Vern O. Knudsen. Figura extraída del libro Knudsen (1932), pág. 140. b) Resultados obtenidos con el cálculo de MFP por Vern O. Knudsen. Tabla extraída del libro Knudsen (1932), pág. 141.

El factor k es el valor que multiplica a V/A en la ecuación del tiempo de reverberación (ecuación 2.39). En la tabla (figura 2.12b) está en unidades del sistema imperial, la conversión al sistema internacional de unidades se obtiene multiplicando por la velocidad del sonido en unidades imperiales (1124 pies/s) y dividiendo por la misma velocidad en unidades métricas (343 m/s), tal que $k_{S.I.} = k_{I.} \cdot 1124/343$.

Este factor k se obtiene mediante:

$$k = l_{MFP} \frac{S \ln 10^6}{Vc} \quad (2.36)$$

Donde: $l_{MFP} \rightarrow$ Es el valor de MFP experimental en metros.

2.2.7. Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación se define como el tiempo que transcurre para que el nivel de presión de un sonido se reduzca $60\ dB$ (una millonésima parte) desde el instante que deja de emitirse. Siempre se expresa en segundos.

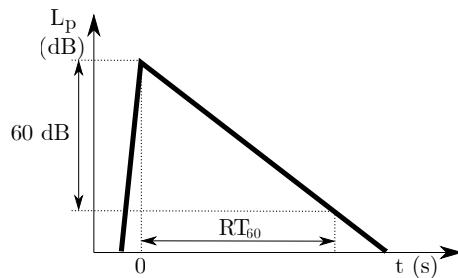


Figura 2.13: Diagrama de la definición de tiempo de reverberación.

En la práctica es difícil medir una caída completa de $60\ dB$ por lo que es habitual utilizar:

EDT: *Early Decay Time*. Es el tiempo que transcurre para que el nivel de presión se reduzca $10\ dB$ desde el instante que deja de emitirse un sonido. Tiene relación con la sensación subjetiva de la reverberación. Definido por Jordan (1970).

T20: Es el tiempo que transcurre desde que se ha reducido $5\ dB$ hasta que se ha reducido $25\ dB$. Describe las propiedades acústicas del recinto. Definido por Atal y cols. (1966).

T30: Es el tiempo que transcurre desde que se ha reducido $5\ dB$ hasta que se ha reducido $35\ dB$. Describe las propiedades acústicas del recinto. Definido por Atal y cols. (1966).

Una vez obtenido uno de estos valores se extrae para obtener el tiempo para una caída de $60\ dB$, es decir, el EDT se multiplica por 6, el T20 por 3 y el T30 por 2. Es una práctica habitual ofrecer el valor T20 o T30 ya extrapolado.

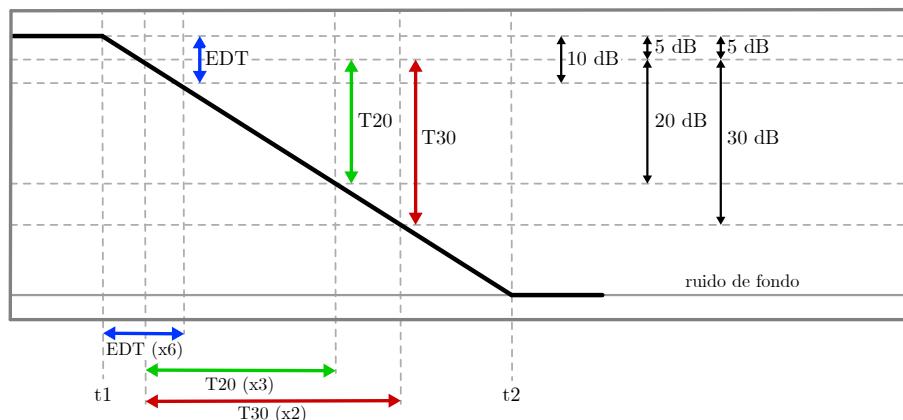


Figura 2.14: Diagrama de la definición de EDT, T20 y T30.

El cálculo teórico del tiempo de reverberación tiene en consideración la superficie, volumen y absorción del recinto. Existen en la literatura múltiples propuestas para el cálculo del tiempo de reverberación, aquí se explicarán las dos más comunes, Sabine y Eyring:

Sabine: Wallace Clement Sabine propuso su método de cálculo al final del siglo XIX que más tarde fue recogido en *Collected Papers on Acoustics* (Sabine, 1922). Este cálculo es útil cuando el coeficiente de absorción medio $\bar{\alpha}$ se encuentra entre 0-0.2 y el reparto es homogéneo, superado este valor el cálculo introduce errores mayores al 10%.

$$T = \frac{l_{\text{MFP}} \ln 10^6}{c \bar{\alpha}} = \frac{4 \ln 10^6 V}{c S \bar{\alpha}} = \frac{4 \ln 10^6 V}{c S \bar{\alpha}} \approx 0,161 \frac{V}{S \bar{\alpha}} \quad (2.37)$$

Eyring: Carl Ferdinand Eyring propuso una mejora en el cálculo de Sabine en Eyring (1930), modificando el término de absorción total o equivalente A . En este caso se corrige el problema para un coeficiente mayor a 0.2 aunque el reparto de los coeficientes debe seguir siendo homogéneo³.

$$T = \frac{l_{\text{MFP}} \ln 10^6}{-c \ln(1 - \bar{\alpha})} = \frac{4 \ln 10^6 V}{-c S \ln(1 - \bar{\alpha})} \approx 0,161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.38)$$

Ambas ecuaciones tienen similitudes y en la literatura es habitual encontrar la ecuación del tiempo de reverberación como:

$$T = k \frac{V}{A} \approx 0,161 \frac{V}{A} \quad (2.39)$$

Donde: $k \rightarrow$ Constante proporcional al MFP del recinto (ecuación 2.36).

$A \rightarrow$ Puede ser $\begin{cases} S \bar{\alpha} & \text{Absorción equivalente de Sabine.} \\ -S \ln(1 - \bar{\alpha}) & \text{Absorción equivalente de Eyring.} \end{cases}$

2.3. Parámetros de inteligibilidad y calidad acústica

La inteligibilidad de forma genérica en la acústica se refiere a la medición de la capacidad para comprender la voz hablada. A continuación se definen algunos de los parámetros más importantes asociados a la inteligibilidad y se comentarán también algunos relacionados con la música. Existen multitud de parámetros para evaluar la inteligibilidad o la calidad acústica de un recinto, en este trabajo se exponen únicamente los desarrollados en el capítulo de resultados. Si se desea conocer muchos de estos parámetros, en Lacatis y cols. (2008) se muestra un histórico de los parámetros acústicos junto a los autores y los artículos.

2.3.1. Claridad C50,C80

La claridad fue establecida por Reichardt y cols. (1974) y ampliada por múltiples autores donde destaca Marshall (1994). Se define, para el caso de la palabra, como la relación entre la

³Para un coeficiente cercano al 1 y/o reparto de coeficientes muy extremos tanto Sabine como Eyring no son fiables, en casos como éste se debe utilizar Millington (1932).

energía acústica recibida durante los primeros 50 milisegundos y la energía acústica después de esos 50 milisegundos, en el caso de la música el tiempo se extiende hasta los 80 milisegundos. El parámetro es adimensional y se expresa en decibelios.

Permite conocer con facilidad si predomina el campo útil sobre el campo perjudicial descritos al inicio de este capítulo. Tanto para el caso de uso para música (80 ms) como para palabra (50 ms) el cálculo general es:

$$C_t = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \right) \quad (2.40)$$

Donde: t → Es el periodo de integración, 50 u 80 milisegundos.

p^2 → Es el valor de presión acústica al cuadrado obtenida con la respuesta al impulso (ver apartado 2.5.2).

Este cálculo se realiza únicamente con los valores obtenidos en las bandas de octava desde 125 Hz hasta la de 4000 Hz. El valor recomendado (ISO 3382-1) para C50 debe estar comprendido entre -4dB y 4dB y para C80 entre -5dB y 5dB.

Además de este cálculo general es habitual el uso de los *promedio (average)*.

El C50 *speech average*, definido por Marshall (1994), tiene en cuenta las bandas de octava de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz, y además incorpora una ponderación para cada una de ellas, quedando el cálculo del siguiente modo:

$$C_{50,AV} = 0.15 \cdot C_{50,500 \text{ Hz}} + 0.25 \cdot C_{50,1 \text{ kHz}} + 0.35 \cdot C_{50,2 \text{ kHz}} + 0.25 \cdot C_{50,4 \text{ kHz}} \quad (2.41)$$

El valor recomendado para el C50 *speak average* según Carrión (1998) debe ser mayor a 2dB.

El C80 *music average* o C80(3), definido también en Marshall (1994), realiza el promedio del valor de claridad para las bandas de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz:

$$C_{80,AV} = \frac{C_{80,500 \text{ Hz}} + C_{80,1 \text{ kHz}} + C_{80,2 \text{ kHz}}}{3} \quad (2.42)$$

El valor recomendado de C80(3) según Beranek (1993) debe estar comprendido entre -4dB y 0dB.

Es posible obtener el parámetro de claridad a partir del de definición (apartado 2.3.2):

$$C_t = 10 \log_{10} \left(\frac{D_t}{1 - D_t} \right) \quad (2.43)$$

2.3.2. Definición D50,D80

El parámetro definición se estableció en Thiele (1953). Es similar a la claridad pero en lugar de relacionar los primeros 50 u 80 milisegundos con el resto del tiempo, se relacionan esos primeros milisegundos con el total. Del mismo modo que la claridad se tienen en cuenta las bandas de octava entre 125 Hz y 4000 Hz.

Este parámetro es adimensional y no tiene unidades.

$$D_t = \frac{\int_0^t p^2(t)dt}{\int_0^\infty p^2(t)dt} \quad (2.44)$$

Donde: $t \rightarrow$ Es el periodo de integración, 50 u 80 milisegundos.

$p^2 \rightarrow$ Es el valor de presión acústica al cuadrado obtenida con la respuesta al impulso (ver apartado 2.5.2).

Este parámetro se puede obtener a través de la claridad operando:

$$D_t = \frac{1}{1 + 10^{-C_t/10}} \quad (2.45)$$

Para el D50, Arau-Puchades (1999) recomienda valores superiores a 0.5. En el caso del D80, dado que casi no es utilizado no hay fuentes en la literatura que recomiendan valores, pero utilizando los valores de claridad C80 recomendados en la ISO 3382-1 se obtienen los valores de definición comprendidos entre 0.25 y 0.75.

2.3.3. Sonoridad G

La sonoridad definida en Lehmann (1976) es el cociente entre el nivel recibido en un punto debido a una fuente sonora omnidireccional y el nivel que genera la misma fuente a 10 metros en campo libre. Este cálculo ofrece información sobre la ganancia acústica que produce un recinto mediante reflexiones y está inversamente relacionado con la absorción acústica del recinto. El parámetro G (*sound strength*) es adimensional y se expresa en escala logarítmica.

Generalmente este parámetro es utilizado en recintos para música. El cálculo tiene mayor utilidad si el recinto es lo suficientemente grande como para que la distancia entre el escenario o punto de emisión y la zona de recepción más cercana sea mayor a 10 metros.

Este parámetro se calcula como:

$$G = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^\infty p^2(t)dt}{\int_0^\infty p_{10m}^2(t)dt} \right) = L_p - L_{p,10m} \quad (2.46)$$

En Beranek (2011) se recomienda un valor entre 4 dB y 7.5 dB para la G_{mid} que se refiere al parámetro G teniendo en cuenta únicamente las bandas de frecuencia de 500 Hz y 1000 Hz.

2.3.4. Índice de articulación AI

El índice de articulación es una herramienta que permite conocer la cantidad de habla que puede percibir un receptor, definido por French y Steinberg (1947) y ampliamente desarrollado por Kryter (1962a), asignando unos pesos a cada banda de frecuencia de la relación señal ruido recibida. Estos pesos están definidos por Kryter para tercios de octava, bandas de octava y bandas de octava habituales (de 250 Hz a 4000 Hz), aquí se va a definir el cálculo para el caso de bandas de octava habituales:

$$AI = \sum_{i=1}^5 W_i R_i \quad (2.47)$$

Donde: $i \rightarrow$ Es el índice de la banda de octava (250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz).

$W_i \rightarrow$ Es el peso para cada banda de frecuencia, indicado en la tabla 2.2.

$R_i \rightarrow$ Es la relación señal ruido para cada banda de frecuencia en dB.

Frecuencia (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Peso W	0.0018	0.0050	0.0075	0.0107	0.0083

Tabla 2.2: Peso de cada banda de octava para el cálculo de AI.

El valor comprende entre 0 y 1, donde 0 es el valor correspondiente al nulo entendimiento del habla y 1 al completo entendimiento de éste.

Kryter también define una corrección del AI debido al tiempo de reverberación del recinto representado por la curva de la figura 2.15.

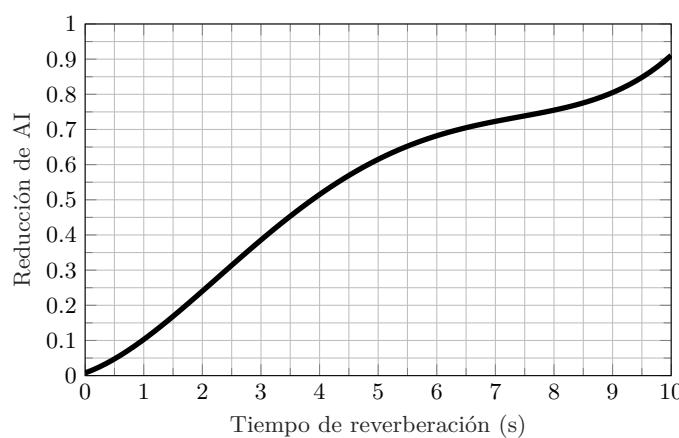


Figura 2.15: Valores de corrección de AI según tiempo de reverberación.

Este parámetro da pie a crear un índice buscando el efecto contrario, zonas donde la

privacidad de la conversación sea máxima, este índice de privacidad se calcula como:

$$PI = 1 - AI \quad (2.48)$$

Teniendo privacidad máxima con un índice igual a 0, y ninguna privacidad con un valor igual a 1.

2.4. Teoría de campos acústicos

La teoría de los campos acústicos aplicada en este trabajo es la desarrollada en el apartado 2.4.3, denominada *teoría revisada corregida*. A continuación se muestran los antecedentes del cálculo de los campos acústicos.

2.4.1. Campos directo y reverberado

El campo directo por definición es el campo generado por las ondas sonoras que no han sufrido reflexiones, mientras que el campo reverberado es el campo generado por las ondas sonoras que han sufrido al menos una reflexión. Habitualmente el campo reverberado se descompone en campo temprano y campo tardío (*early field* y *late field*). También se puede denominar reflexión temprana y tardía o primeras reflexiones y cola reverberante.

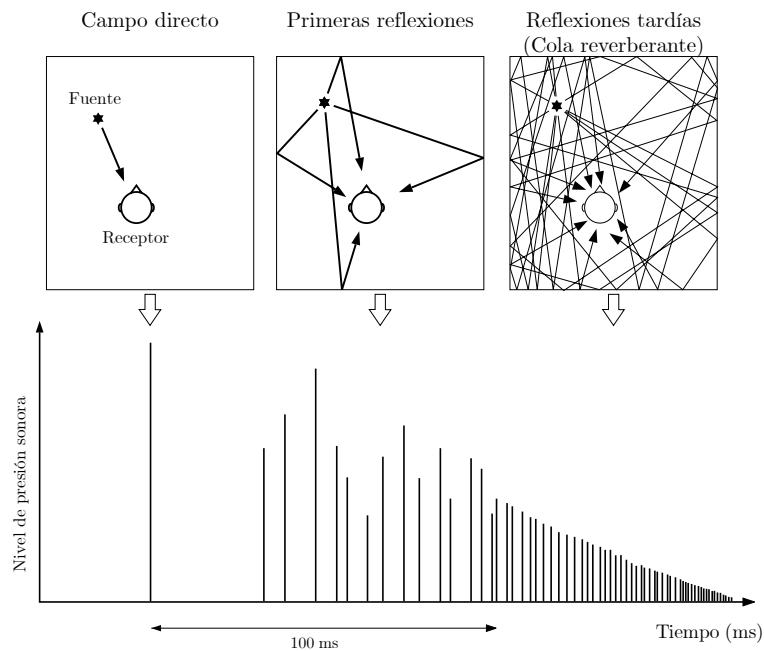


Figura 2.16: Ecograma asociado a un receptor con indicación del campo directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante. Figura extraída de Carrión (1998), pág. 50.

Un ecograma (figura 2.16) muestra el nivel y tiempo de llegada de cada rayo sonoro a un receptor, facilitando la representación de los campos acústicos en el receptor. En la práctica es relativamente sencillo desglosar la historia temporal (campo directo, primeras reflexiones

y cola reverberante), se suele separar la pendiente en Δt para separar el campo en un símil de rayos acústicos. Habitualmente se separa en incrementos de 1 milisegundo.

Para el cálculo teórico se ha escrito mucho pero existe una teoría sobradamente aceptada; es la propuesta de Hopkins y Stryker (1948) que describe el campo acústico total como la suma del campo directo y el campo reverberado, que años más tarde fue modificada por Davis (1984). Este cálculo asume que el campo reverberante es estacionario, es decir, constante en cualquier punto del recinto.

$$I = \frac{WQ}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} \quad (2.49)$$

Donde: $I \rightarrow$ Es la intensidad acústica total en W/m^2 .

$r \rightarrow$ Es la distancia emisor-receptor en metros.

$A \rightarrow$ Es la absorción equivalente de Sabine o Eyring.

El término $WQ/4\pi r^2$ corresponde a la intensidad del campo directo a distancia r de la fuente y el término $4W/A$ corresponde a la intensidad del campo reverberado que, como se puede observar, presupone que es constante en cualquier punto del recinto.

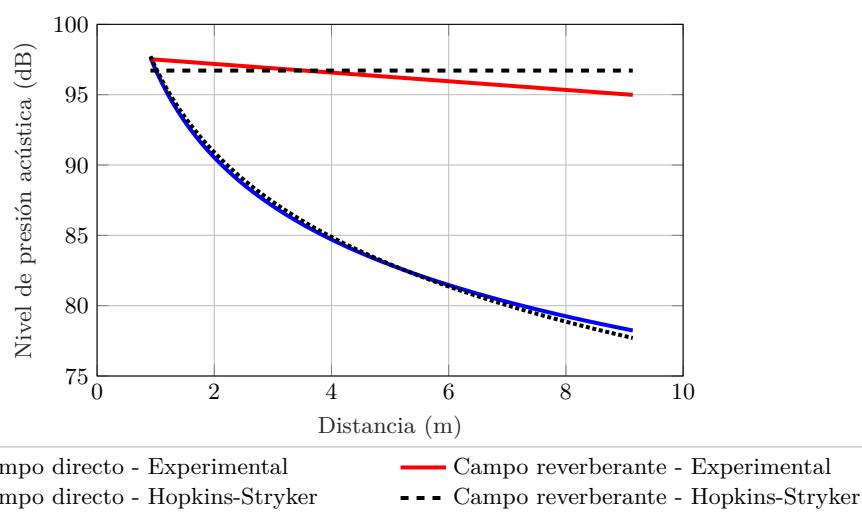


Figura 2.17: Comparación de los campos acústicos obtenidos experimentalmente y mediante la ecuación Hopkins-Stryker. El tiempo de integración del experimental es 0-1 ms para el campo directo y 1- ∞ para el campo reverberante.

Se ha comprobado empíricamente que el término de campo directo corresponde aproximadamente al espacio temporal de 0 a 1ms^4 de un ecograma y el término del campo reverberado corresponde aproximadamente al espacio temporal desde 1ms a infinito (figura 2.17).

⁴Esta afirmación es válida cuando los datos son ideales temporalmente hablando, tal como los ofrece un programa de simulación acústica, en la práctica el espacio temporal del campo directo fluctúa entre los 2 y los 10 milisegundos.

2.4.1.1. Distancia crítica

La distancia crítica se define como la distancia donde el campo directo y el reverberado se cruzan, a partir de este punto el campo reverberante predomina sobre el campo directo y se indica como una zona de baja inteligibilidad. Esto no es correcto, estando comprobado empíricamente que esta distancia no se aproxima a la zona donde la inteligibilidad se reduce.

El cálculo de la distancia crítica es una función derivada de la ecuación Hopkins-Stryker 2.49, se puede obtener fácilmente igualando los términos de ambos campos y despejando la distancia, así se obtiene la distancia donde el valor de los campos es el mismo.

$$\frac{WQ}{4\pi D_c^2} = \frac{4W}{A}$$

$$\frac{Q}{4\pi D_c^2} = \frac{4}{A}$$

$$D_c = \sqrt{\frac{QA}{16\pi}} \quad (2.50)$$

Donde: D_c → Es la distancia crítica en metros.

A → Es la absorción equivalente de Sabine o Eyring.

2.4.2. Teoría revisada o moderna

La *teoría revisada o teoría moderna* es una mejora del cálculo de campos acústicos propuesta por Barron y Lee (1988) y ampliada en Barron (2015), en la que se describe mejor el comportamiento de los mismos. En esta *teoría revisada* el campo reverberante ya no se considera estacionario o constante sino que tiene una pendiente respecto a la distancia, además permite obtener los campos acústicos definiendo un tiempo de integración para los diferentes campos.

El campo total se calcula como:

$$I_0^\infty(r, t) = \frac{WQ}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} 10^{-\left(\frac{60t}{10T}\right)}$$

$$I_0^\infty(r, t) = \frac{WQ}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{6 \ln(10)t}{T}\right)}$$

$$I_0^\infty(r, t) = \frac{WQ}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13.82t}{T}\right)} \quad (2.51)$$

Donde: I_0^∞ → Es la intensidad acústica total en W/m^2 . Desde 0 milisegundos a infinito (fin de la cola reverberante).

r → Es la distancia emisor-receptor en metros.

t → Es el tiempo que tarda el sonido desde el emisor al receptor en segundos.

T → Es el tiempo de reverberación.

A → Es la absorción equivalente de Sabine o Eyring.

El tiempo t se puede sustituir por r/c para que en lugar de estar en función del tiempo y la distancia se calcule sólo en función de la distancia emisor-receptor (r = distancia ; c = velocidad del sonido en el aire).

La ecuación permite obtener el campo de primeras reflexiones y el de cola reverberante por separado a partir del término de campo reverberante incluido en la ecuación 2.51 (segundo sumando). Con ello es posible redefinir los campos como *campo útil* ($0 - t_0$) y *campo perjudicial* ($t_0 - \infty$). El campo útil incluye el campo directo y el campo temprano; y el campo perjudicial el campo reverberante. Para obtener el campo temprano se realiza la diferencia entre el total del campo reverberante (segundo sumando de la ecuación anterior) y el campo a partir de cierto tiempo de integración (campo reverberante), obteniendo así el campo entre 1 milisegundo y t_0 también denominado temprano o *early*.

$$I_L = I_t^\infty(r) = \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\right)} \quad (2.52)$$

$$I_E = I_1^t(r) = \frac{4W}{A} \left(e^{-\left(\frac{13,82\frac{r}{c}}{T}\right)} - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\right)} \right) \quad (2.53)$$

Donde: $I_t^\infty \rightarrow$ Es la intensidad del campo tardío o cola reverberante (*Late*) en W/m^2 desde el tiempo t_0 a infinito. Este campo pasa a denominarse *campo perjudicial*.

$I_1^t \rightarrow$ Es la intensidad del campo temprano o primeras reflexiones (*Early*) en W/m^2 desde 1 ms a t_0 . No tiene en cuenta el campo directo que ocupa el espacio temporal de 0 a 1 milisegundo⁴.

$t_0 \rightarrow$ Es el tiempo de integración, en segundos, donde terminan las primeras reflexiones y comienza la cola reverberante. En recintos para palabra el tiempo son 50 milisegundos y para música 80 milisegundos (Hass, 1951).

Por lo que el cálculo general de la teoría revisada para el campo útil y el campo perjudicial se calculan como:

$$I_t^\infty(r) = \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\right)} \quad (2.54)$$

$$I_0^t(r) = \frac{WQ}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} \left(e^{-\left(\frac{13,82\frac{r}{c}}{T}\right)} - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\right)} \right) \quad (2.55)$$

Donde: $I_0^t \rightarrow$ Es la intensidad del campo útil en W/m^2 para el tiempo de integración de 0 a t_0 .

$I_t^\infty \rightarrow$ Es la intensidad del campo perjudicial en W/m^2 para el tiempo de integración de t_0 a infinito.

También es posible obtener directamente el nivel de presión acústica teniendo en cuenta la ecuación 2.20 y 2.13:

$$L_{pt}^{\infty}(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{Z}{p_0^2} \left(\frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\right)} \right) \right] \quad (2.56)$$

$$L_{p0}^t(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{Z}{p_0^2} \left(\frac{WQ}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} \left(e^{-\left(\frac{13,82 \frac{r}{c}}{T}\right)} - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\right)} \right) \right) \right] \quad (2.57)$$

Como curiosidad, Barron y Lee (1988) proponen introducir la potencia acústica en picovatios (10^{-12}), con ello el término $Z/p_0^2 \approx 10^{12}$ se anula. Esta simplificación introduce una pérdida aproximada del 3% de intensidad acústica, por lo que la simplificación no se utilizará.

Se ha comparado la *teoría revisada* de Barron y Lee (1988) con los resultados obtenidos experimentalmente (figura 2.18) y siguen sin ajustarse al comportamiento real de un recinto; las pendientes son similares pero los niveles absolutos no se ajustan, por lo que el punto de cruce o distancia crítica obtenida con la *teoría revisada* no es correcta.

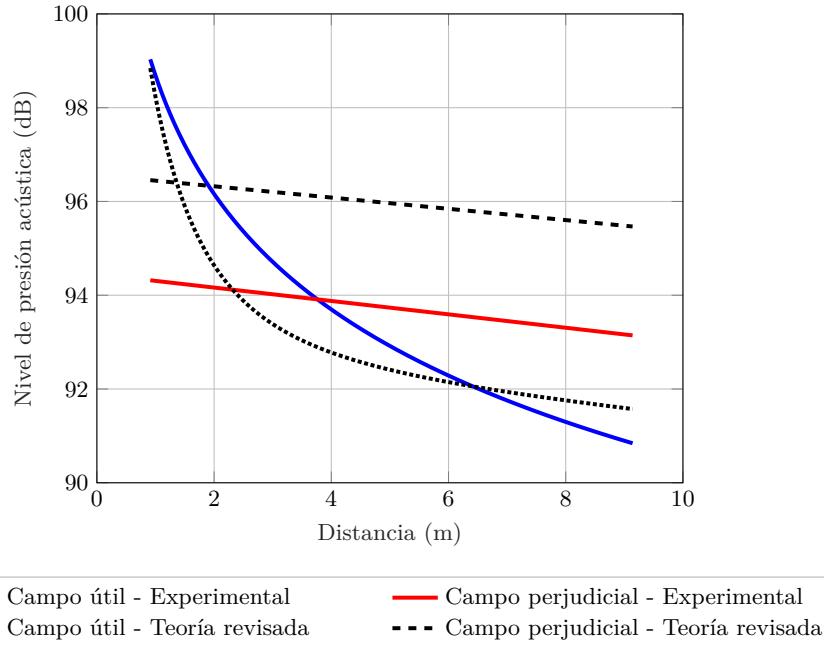


Figura 2.18: Comparación de los campos acústicos obtenidos experimentalmente y mediante Barron y Lee (1988). El tiempo de integración es 50 ms.

2.4.3. Teoría revisada corregida

Como solución al problema de la *teoría revisada* se ha propuesto en Sato y Bradley (2008) incluir una serie de coeficientes de ajuste para adaptar los campos acústicos obtenidos con la *teoría revisada* a los campos acústicos obtenidos experimentalmente. La solución propuesta asume una serie de aproximaciones que no se van a trasladar en este trabajo, también se ha modificado la ubicación de algunos coeficientes. Estos cambios quedan del siguiente modo:

$$I_L(r) = \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L$$

$$I_E(r) = \frac{4W}{A} \left(e^{-\left(\frac{13,82\frac{r}{c}}{T}\epsilon_E\right)} C_E - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \right)$$

$$I_D(r) = \frac{WQ}{4\pi r^2} C_D$$

Donde: $I_D, I_E, I_L \rightarrow$ Son las intensidades de los campos directo (0-1ms), temprano (1ms- t_0) y tardío ($t_0-\infty$) respectivamente.

$\epsilon_L, C_L \rightarrow$ Son los coeficientes del campo perjudicial (Late).

$C_D \rightarrow$ Es el coeficiente del campo directo (Direct).

$\epsilon_E, C_E \rightarrow$ Son los coeficientes del campo de primeras reflexiones (Early).

A raíz de este trabajo se han analizado los tres campos por separado (para el periodo de integración de 50 ms) tanto en mediciones in situ como en simulaciones acústicas y se ha observado que el campo temprano (1 - 50 ms) no tiene un comportamiento lineal como ya proponía la ecuación 2.53 de Barron y Lee y utilizada por Sato y Bradley (2008), sino que éste se reduce con la inversa de la distancia, en la figura 2.19 se observan los campos tempranos de los dos recintos que se analizan en la sección 4.1, también el campo temprano teórico tal como se ha propuesto en la literatura hasta el momento y el campo temprano tal como se propone calcular en este trabajo (ecuación 2.59).

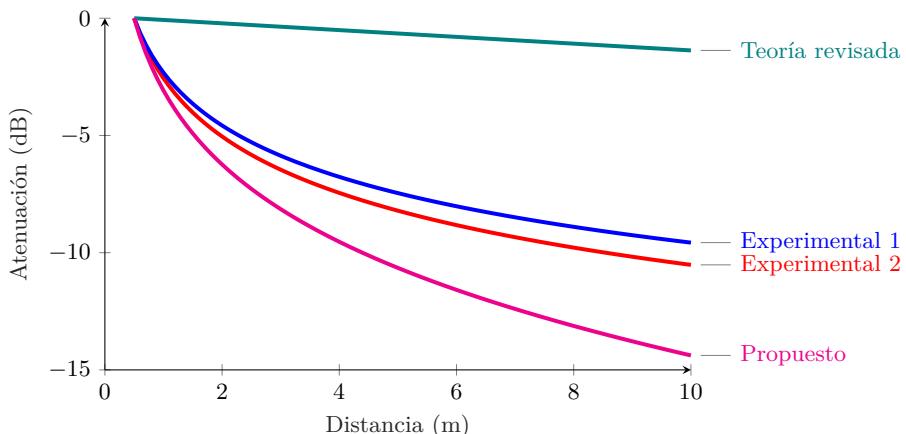


Figura 2.19: Comparación de los campos tempranos (1ms-50ms) del aula OP/S003, EP/0-26M, teórico según Sato y Bradley (2008) y teórico propuesto por el autor de este trabajo.

La hipótesis de este comportamiento del campo temprano es que este campo incluye las primeras reflexiones y generalmente, sobretodo en recintos rectangulares, estos *rayos* reflejados tienen la misma dirección de propagación produciendo que la onda acústica esférica del campo directo se comporte en este campo como una onda cilíndrica.

La hipótesis del decaimiento del campo temprano con la inversa de la distancia se basa en los siguientes supuestos:

Supuesto 1: El recinto tiene forma rectangular.

Supuesto 2: Sólo existe una fuente sonora y ésta es omnidireccional.

Supuesto 3: El tiempo de integración del campo temprano comprende el intervalo temporal entre 1 ms y 50 ms.

Supuesto 4: El volumen del recinto es superior a 600 m^3 .

Será objeto de estudio en futuros trabajos el comportamiento del campo temprano en otros recintos con diferentes factores de forma y distintas fuentes para validar esta hipótesis en los diferentes casos o por el contrario confirmar este comportamiento únicamente con los supuestos enunciados anteriormente (el supuesto número 4 ha sido sólo comprobado mediante simulaciones).

Por lo tanto, los cálculos de los campos teniendo en cuenta la propuesta para el campo temprano de incluir la inversa de la distancia, quedan del siguiente modo:

$$I_L(r) = \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \quad (2.58)$$

$$I_E(r) = \frac{4W}{Ar} \left(e^{-\left(\frac{13,82\frac{r}{c}}{T}\epsilon_E\right)} C_E - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \right) \quad (2.59)$$

$$I_D(r) = \frac{WQ}{4\pi r^2} C_D \quad (2.60)$$

$$I_{\text{útil}} = I_D + I_E \quad (2.61)$$

$$I_{\text{perjudicial}} = I_L \quad (2.62)$$

Donde: $I_D, I_E, I_L \rightarrow$ Son las intensidades de los campos directo (0-1ms), temprano (1ms-t) y tardío ($t-\infty$) respectivamente.

$\epsilon_L, C_L \rightarrow$ Son los coeficientes del campo perjudicial (Late).

$C_D \rightarrow$ Es el coeficiente del campo directo (Direct).

$\epsilon_E, C_E \rightarrow$ Son los coeficientes del campo de primeras reflexiones (Early).

Del mismo modo que en la teoría revisada (2.4.2) se puede calcular directamente el nivel de presión acústica del campo útil (0- t_0 ms) y del campo perjudicial (t_0 ms- ∞).

$$L_{p,\text{perjudicial}}(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{Z}{p_0^2} \left(\frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \right) \right] \quad (2.63)$$

$$L_{p,\text{útil}}(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{Z}{p_0^2} \left(\frac{WQ}{4\pi r^2} C_D + \frac{4W}{Ar} \left(e^{-\left(\frac{13,82\frac{r}{c}}{T}\epsilon_E\right)} C_E - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \right) \right) \right] \quad (2.64)$$

Los coeficientes propuestos se obtienen a partir del ajuste de las curvas de la teoría revisada corregida respecto a las curvas obtenidas experimentalmente o con simulaciones acústicas mediante regresión.

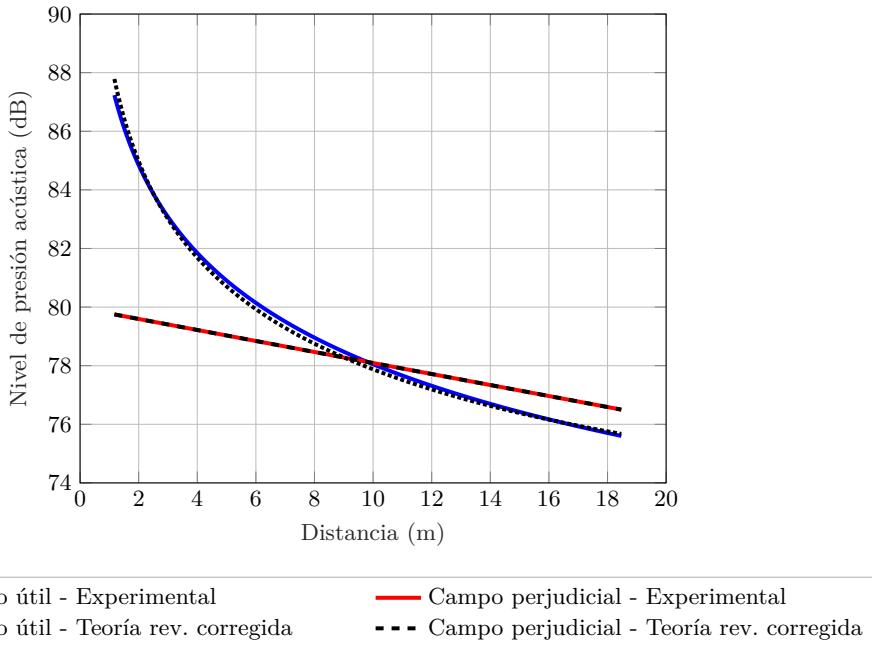


Figura 2.20: Comparación de los campos acústicos obtenidos experimentalmente y mediante la teoría revisada corregida. El tiempo de integración es 50 ms y los coeficientes: $\epsilon_L = 1.244$, $C_L = 1.268$, $C_D = 1.070$, $\epsilon_E = -0.296$ y $C_E = 3.588$.

2.5. Otros conceptos

En este trabajo se han utilizado en las medidas in situ señales MLS, y tanto en las medidas in situ como en los modelos se han obtenido las respuestas al impulso en distintas ubicaciones del recinto (receptores), a continuación se describen estos conceptos.

2.5.1. Señal MLS

Una señal MLS (*maximum length sequence*) está constituida por variaciones pseudoaleatorias entre -1 y 1, con periodo $P = 2^N - 1/f_{clock}$ (N es el número de bits y f_{clock} es la frecuencia de reloj del sistema que genera la señal MLS) y una respuesta en frecuencia plana, es decir, igual al ruido blanco (apartado 2.1.16). La pseudoaleatoriedad de la señal se refiere a que es periódica y en cada periodo tiene una aleatoriedad conocida, esto permite comparar correctamente la señal emitida con la captada.

Esta señal permite mediante un proceso, que se resume a continuación, eliminar ruidos de fondo y obtener una respuesta en frecuencia y temporal de la probeta de medida (material, recinto, equipo, etc) definida.

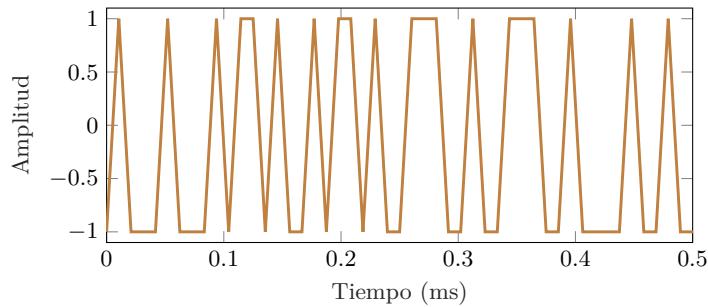


Figura 2.21: Fracción temporal de una señal MLS.

La señal se basa en la teoría de secuencias de registro de desplazamiento ampliamente desarrollada en Golomb (1967). Una vez emitida y captada la señal en los puntos deseados, se puede obtener la respuesta al impulso (apartado 2.5.2) mediante una correlación cruzada de la señal emitida y la captada o mediante la transformada de Hadamard (Sylvester, 1908).

El desarrollo extenso de estos procesos se pueden consultar en Cohn y Lempel (1977) o Sarwate y Pursley (1980). En este trabajo no se va a extender la descripción de la MLS ni su proceso ya que no se ha desarrollado ninguna herramienta que haga uso de esta señal, sólo es utilizado internamente en el software 01dB.

2.5.2. Respuesta al impulso

La respuesta al impulso (también llamada respuesta impulsiva) de un sistema es la salida de éste al introducirle un impulso. Este impulso, idealmente, es infinitamente corto en el tiempo y de amplitud infinitamente alta, en la práctica esto es imposible por lo que se hace uso de un pulso muy corto y de amplitud controlada para una vez obtenida la respuesta al impulso se pueda obtener unos niveles calibrados según la entrada.

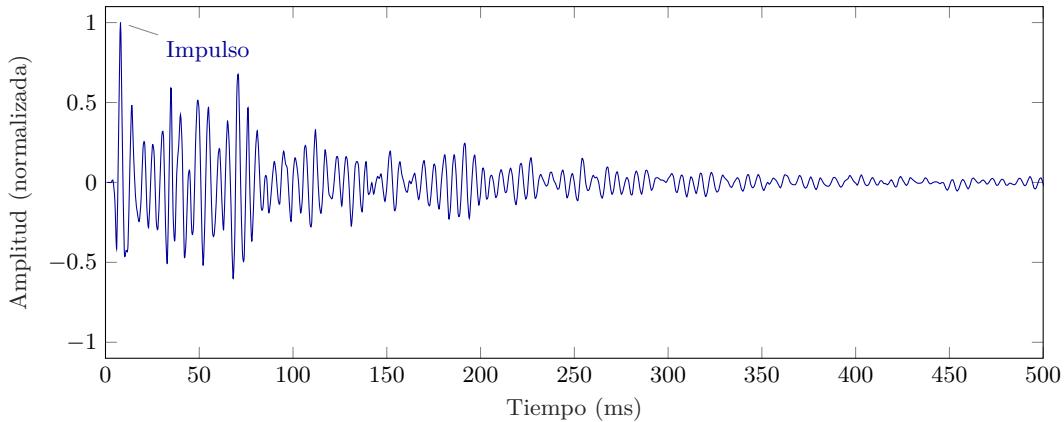


Figura 2.22: Respuesta al impulso de un sistema.

3. Objetivos

El factor común de los objetivos de este estudio es el análisis de los campos acústicos frente a la distancia y la prominencia del campo útil (0 a 50ms) sobre el campo perjudicial (50ms a ∞). Se busca obtener los siguientes puntos:

3.0.0.0.1. Validación de modelos

Habitualmente los modelos acústicos de recintos son validados únicamente por el valor del tiempo de reverberación, comparando el calculado con el medido experimentalmente, esto aunque es válido no confirma con seguridad que el comportamiento acústico sea similar al recinto real. Por ello, se ha buscado un parámetro más para comparar el modelo con el recinto real y poder confirmar la validez de éste, en concreto se analizan los campos acústicos obteniendo un ecograma para cada receptor y dividiendo temporalmente en dos partes los valores (ver figura 3.1) para obtener finalmente una pareja de curvas de niveles de presión acústica frente a la distancia a la fuente (ver figura 3.2).

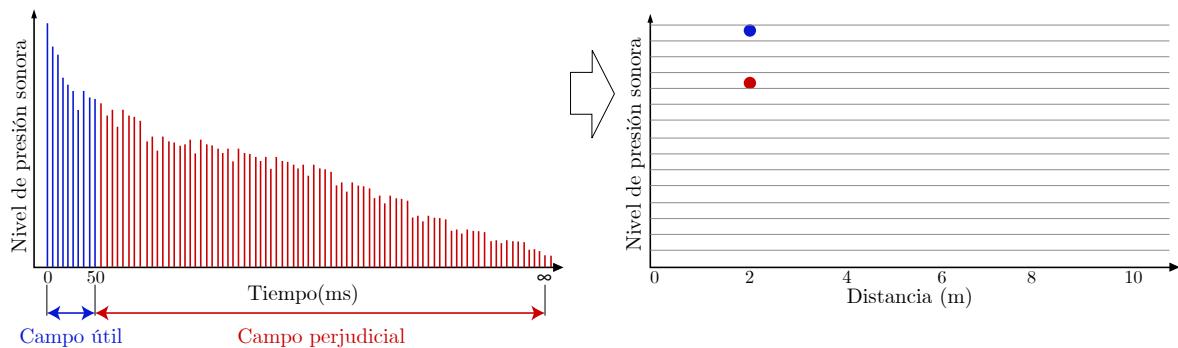


Figura 3.1: Proceso para separar los campos útil y perjudicial a partir de un ecograma. Ejemplo de un receptor a 2 metros de la fuente.

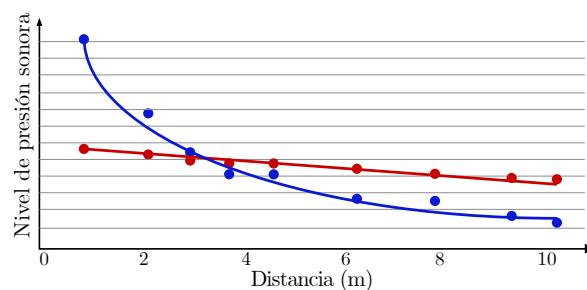


Figura 3.2: Resultado al separar los campos útil y perjudicial a partir de ecogramas de múltiples receptores a diferentes distancias de la fuente.

Dentro del capítulo de desarrollo en el apartado *validación de modelos* (4.2) se pueden observar los detalles de esta validación y las opciones para realizarla a través de los programas CATT-Acoustic y EASE. Además de esta validación también es posible comparar parámetros como la claridad o la definición mediante las ecuaciones definidas en el apartado de inteligibilidad (4.5).

3.0.0.0.2. Factores de corrección para el cálculo de campos acústicos

Una vez definida en este estudio la *teoría revisada corregida* (2.4.3) se tratará de obtener, por medio de medidas en recintos de diferentes tamaños y características, unos coeficientes de corrección para cada uno de ellos. Estos coeficientes se analizarán al detalle para determinar si son coherentes con lo que se espera del comportamiento de los campos acústicos (apartado 5.2.3) y una vez comprobado se buscará una posible relación entre los parámetros del recinto y los factores de corrección para así poder aplicar en otros recintos el cálculo de los campos acústicos sin tener que acudir a mediciones in situ o modelos acústicos.

3.0.0.0.3. Desarrollo de herramientas

Para la realización de los objetivos anteriores es necesario desarrollar herramientas para analizar y calcular los campos acústicos y coeficientes con el mayor control posible sobre las variables. Las herramientas desarrolladas se basan en el programa Matlab debido a la facilidad para analizar cada una de las variables, realizar regresiones multivariable y desarrollo de interfaces de usuario. Las descripciones de estas herramientas se encuentran en el anexo A y se encuentran disponibles en la plataforma GitHub para su análisis y futuras mejoras.

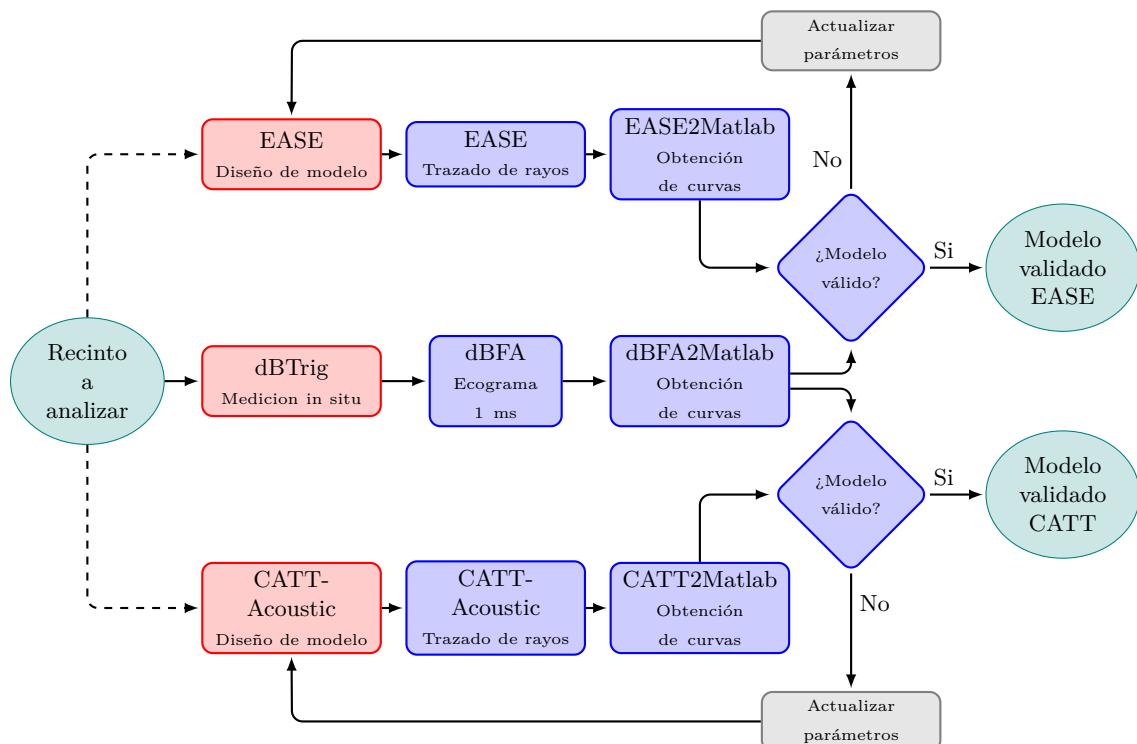


Figura 3.3: Diagrama de la metodología aplicada para la validación de modelos.

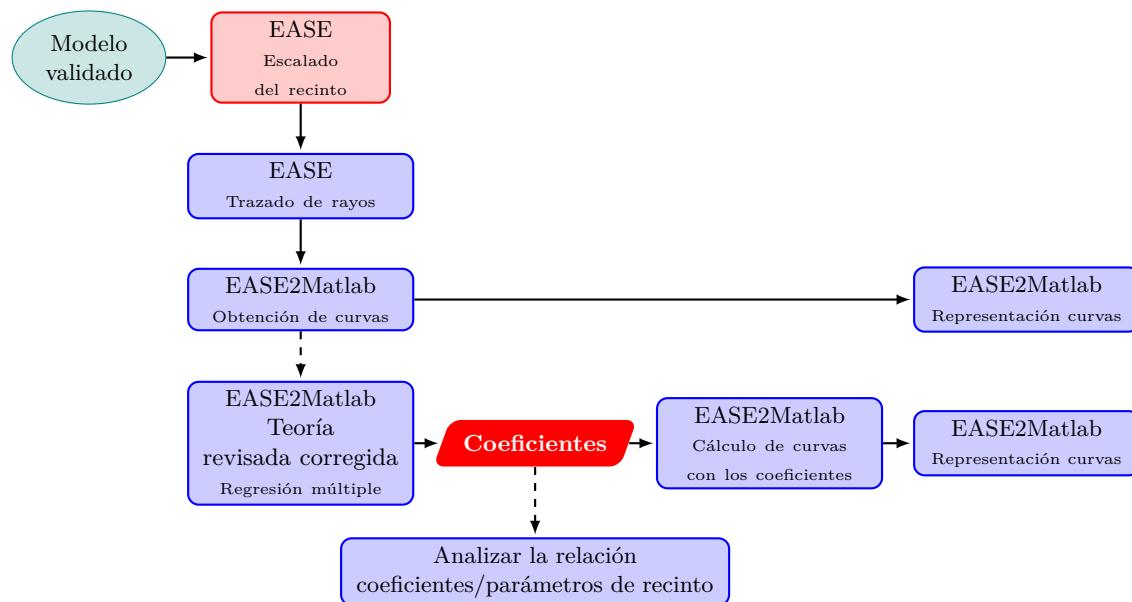


Figura 3.4: Diagrama de los pasos para la obtención de coeficientes y posterior análisis.

4. Desarrollo

Debido a la imposibilidad temporal de realizar mediciones acústicas *in situ* en múltiples recintos se ha optado por realizar estas mediciones en dos recintos diferentes para después obtener unos modelos válidos en los programas de simulación acústica *CATT-Acoustic* y *EASE*.

En primer lugar se van a mostrar los dos recintos reales y los resultados obtenidos para después validar estos datos con los modelos configurados para la simulación.

Una vez validados los modelos se utilizarán estos para realizar modificaciones en los recintos, observar el comportamiento acústico y ajustar las ecuaciones de la teoría revisada corregida (sección 2.4.3) para igualar los campos acústicos calculados a los campos acústicos obtenidos mediante simulación (campo útil y campo perjudicial). Con ello se obtendrá una relación de parámetros acústicos del recinto y los coeficientes de ajuste.

4.1. Mediciones *in situ*

Las mediciones se han realizado en dos recintos diferentes, ambos ubicados en la Universidad de Alicante (ambos recintos se describen ampliamente en los apartados siguientes):

Aula OP/S003: Aula ubicada en la Escuela de Óptica y Optometría.

Aula EP/0-26M: Aula ubicada en la Escuela Politécnica Superior IV.

El equipo utilizado para la medición y posterior procesado está formado por una fuente omnidireccional dodecaédrica, micrófonos de medición de media pulgada y el software dBFA32 de 01dB utilizando señales MLS.

El software dBFA32 permite obtener la historia temporal (decaimiento del sonido respecto al tiempo) en fracciones de 1 milisegundo, estos datos serán utilizados para obtener los campos útil (0 a 50ms) y perjudicial (50 a ∞ ms) que serán comparados con los obtenidos en los modelos de CATT-Acoustic y EASE para validar las simulaciones.

Ambos recintos se han medido con mobiliario y sin él (mesas y sillas de estudiante) para comprobar la influencia de estos elementos en la distribución de los campos acústicos y, con dos ubicaciones de la fuente, en el centro y en una esquina.

Los datos se ofrecen con curvas de regresión, de tipo potencial para el campo útil y de tipo polinómica de grado uno para el campo perjudicial. La validación de los modelos vendrá dada por la comparación de las curvas de regresión de los campos.

4.1.1. Aula OP/S003

El aula OP/S003 está ubicada en la planta sótano de la Escuela de Óptica y Optometría de la Universidad de Alicante.



Figura 4.1: Aula OP/S003.

Los detalles del recinto son:

- **Dimensiones:** 18.9x9.6x2.8 m.
- **Volumen:** ~500 m³.
- **Superficie recinto:** ~520 m².
- **Número de mesas:** 72 (dimensiones 1.20x0.45 m).
- **Número de sillas:** 144 (dimensiones 0.44x0.51 m).

Los materiales y sus absorciones según la literatura son:

- Cerramientos laterales de hormigón armado: $\bar{\alpha} \approx 0.02$.
- Cerramientos transversales de placa de yeso pintado: $\bar{\alpha} \approx 0.03$.
- Suelo de terrazo: $\bar{\alpha} \approx 0.02$.
- Techo registrable de escayola: $\bar{\alpha} \approx 0.10$.
- Móbelario de paneles multilaminados: $\bar{\alpha} \approx 0.03$.

Las medidas de tiempo de reverberación del recinto por bandas de octava son:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{60} Con mobiliario (s)	1.12	1.56	1.73	1.43	1.33	1.26	1.02
T_{60} Sin mobiliario (s)	1.20	1.81	2.03	1.87	1.69	1.66	1.30

Tabla 4.1: Tiempos de reverberación obtenidos en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario.

Las posiciones de los receptores y las fuentes se muestran en las figuras 4.2, en el caso de las medidas con mobiliario se han utilizado 48 puntos de recepción y sin mobiliario 22 puntos de recepción.

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran los campos útil (0 a 50 ms) y perjudicial (50 a ∞ ms) obtenidos tanto con la fuente en la esquina como en el centro y con mobiliario o sin él.

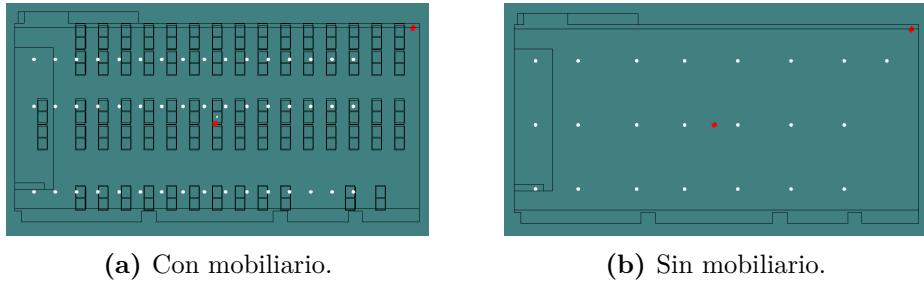


Figura 4.2: Puntos de recepción (círculos blancos) y fuentes (rectángulos rojos) en aula OP/S003.

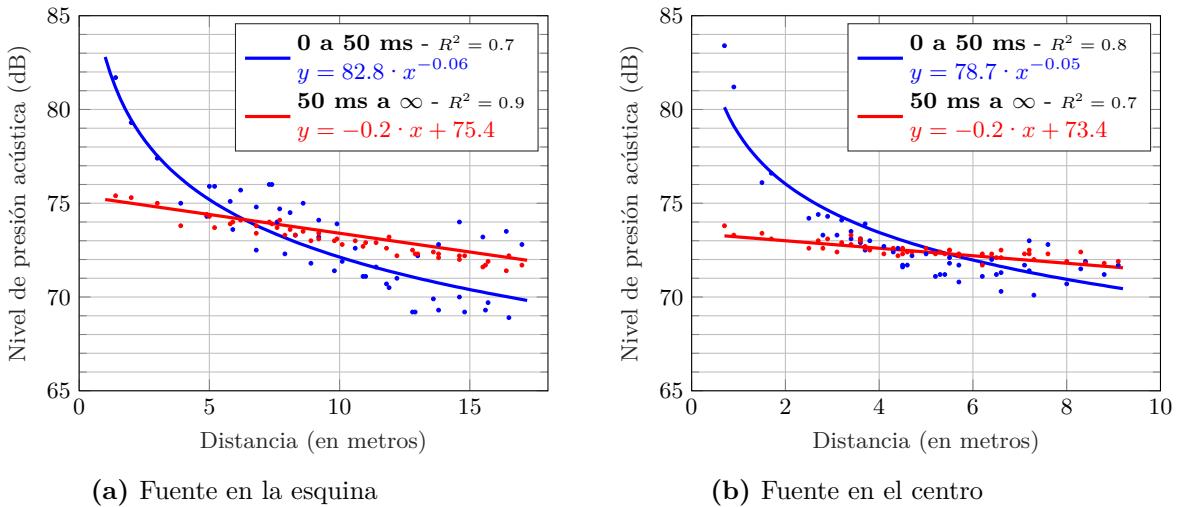


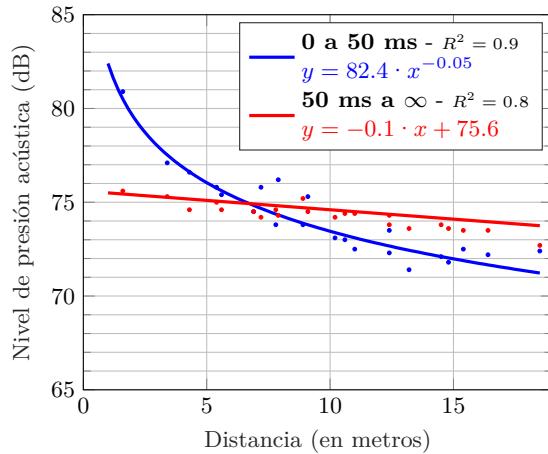
Figura 4.3: Campos acústicos en el aula OP/S003 con mobiliario. 48 puntos de medida.

En el caso con mobiliario (figura 4.3), la distancia de cruce de campos con fuente en esquina es de 6.4 metros, con fuente en el centro es de 5.4 metros. Se han realizado un total de 48 medidas en diferentes puntos.

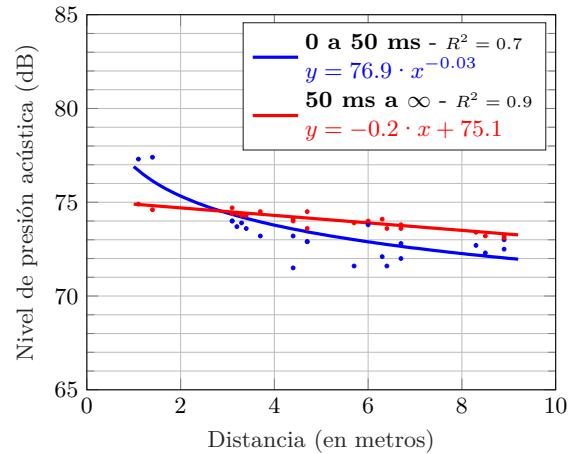
En el caso sin mobiliario (figura 4.4), la distancia de cruce de campos con fuente en esquina es de 6.6 metros, con fuente en el centro es de 2.8 metros. Se han realizado un total de 22 medidas en diferentes puntos.

Comparando ambos casos (con y sin mobiliario), los campos y cruce con la fuente en la esquina son similares, pero con la fuente en el centro la pendiente del campo útil (0 a 50 ms) es ligeramente distinta debido posiblemente a la reducción de los puntos de medida en las medidas sin mobiliario.

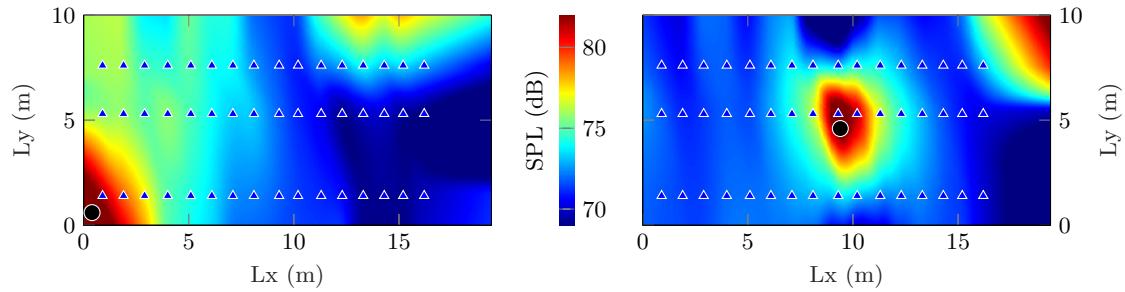
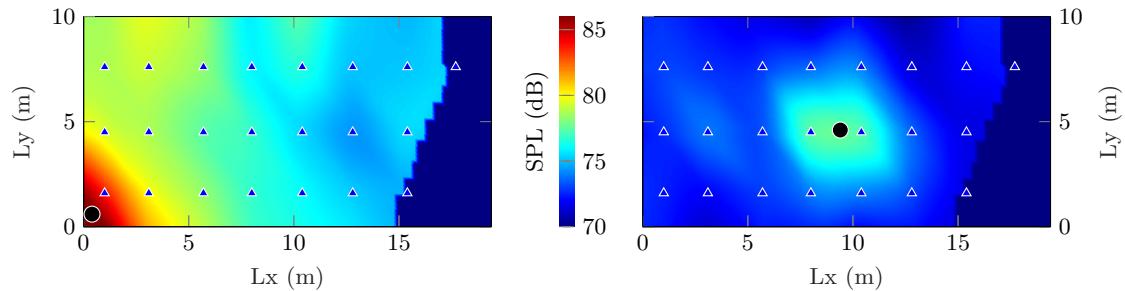
Para ampliar la información obtenida a través de las medidas en el recinto, se han representado mapas de niveles de presión acústica tanto para los campos útiles (figuras 4.5 y 4.6) como para los campos perjudiciales (figuras 4.7 y 4.8) permitiendo observar espacialmente los campos acústicos.



(a) Fuente en la esquina



(b) Fuente en el centro

Figura 4.4: Campos acústicos en el aula OP/S003 sin mobiliario. 22 puntos de medida**Figura 4.5:** Campos útiles (0 a 50ms) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos)**Figura 4.6:** Campos útiles (0 a 50ms) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos)

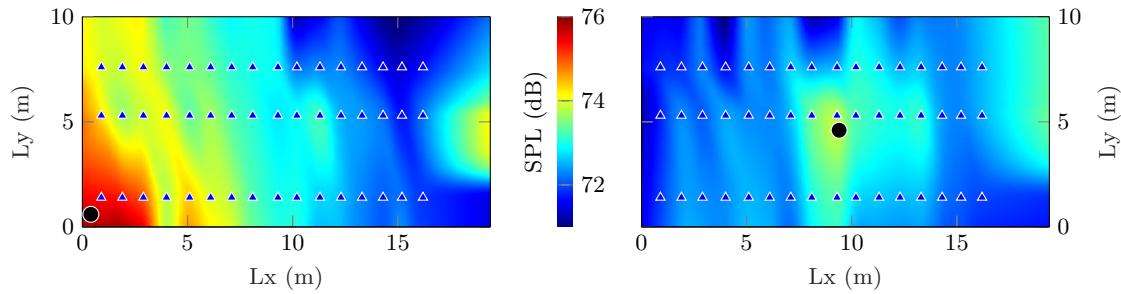


Figura 4.7: Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos)

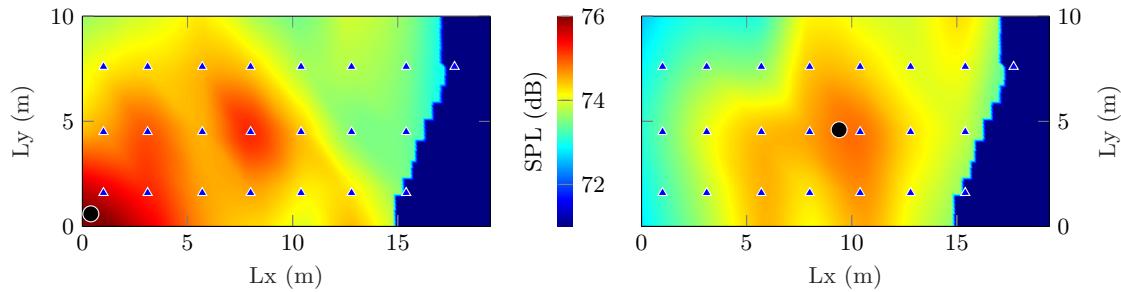


Figura 4.8: Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula OP/S003 sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 48 puntos de medida (triángulos)

Debido al método de extrapolación en las zonas entre los puntos de recepción y los límites del recinto se producen ciertos artefactos como los que aparecen en el lado derecho de ambos mapas de la figura 4.7.

4.1.2. Aula EP/0-26M

El aula EP/0-26M está ubicada en la planta baja de la Escuela Politécnica Superior IV de la Universidad de Alicante.

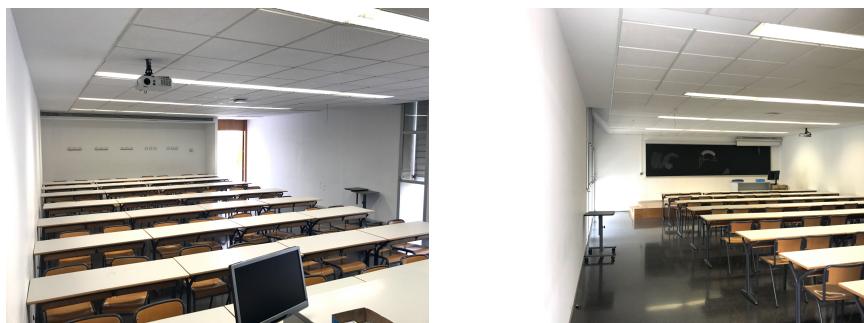


Figura 4.9: Aula EP/0-26M.

Los detalles del recinto son:

- **Dimensiones:** $11.9 \times 7.1 \times 2.7 \text{ m}$.
- **Volumen:** $\sim 230 \text{ m}^3$.
- **Superficie recinto:** $\sim 270 \text{ m}^2$.
- **Número de mesas:** 32 (dimensiones $1.20 \times 0.45 \text{ m}$).
- **Número de sillas:** 64 (dimensiones $0.44 \times 0.51 \text{ m}$).

Los materiales y sus absorciones según la literatura son:

- Cerramientos transversales y del lateral con ventana, de hormigón armado: $\bar{\alpha} \approx 0.02$.
- Cerramientos laterales de placa de yeso pintado: $\bar{\alpha} \approx 0.03$.
- Suelo de terrazo: $\bar{\alpha} \approx 0.02$.
- Techo registrable de escayola: $\bar{\alpha} \approx 0.10$.
- Móbelario de paneles multilaminados: $\bar{\alpha} \approx 0.03$.
- Ventanales: $\bar{\alpha} \approx 0.03$

Las medidas del tiempo de reverberación por bandas de octava son:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{60} Con mobiliario (s)	1.34	1.50	1.45	1.28	1.17	1.05	0.76
T_{60} Sin mobiliario (s)	1.31	1.57	1.57	1.43	1.30	1.16	0.84

Tabla 4.2: Tiempos de reverberación obtenidos en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario.

Las posiciones de los receptores y las fuentes se muestran en las figuras 4.10, un total de 30 receptores y 2 fuentes.

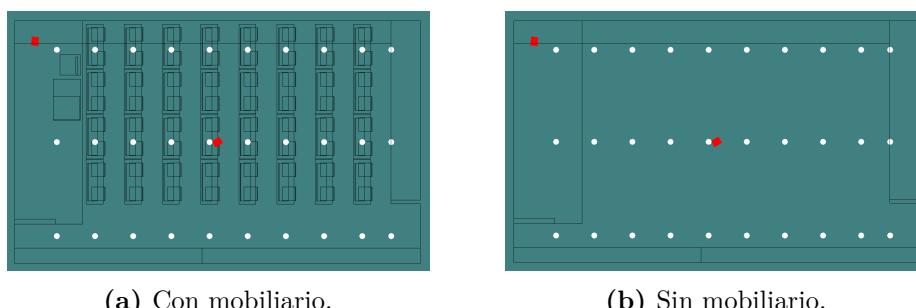


Figura 4.10: Puntos de recepción (círculos blancos) y fuentes (rectángulos rojos) en aula EP/0-26M.

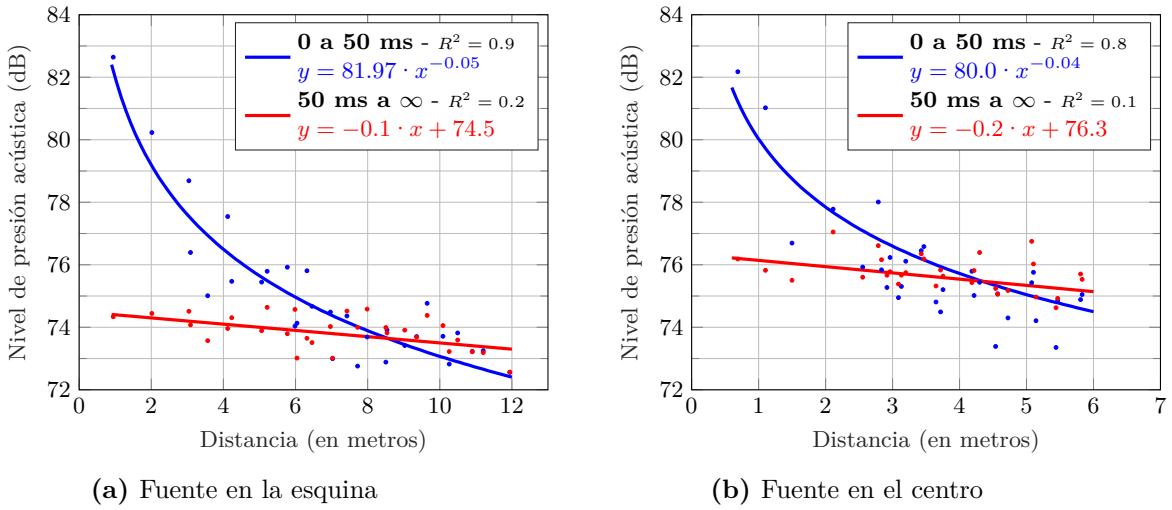


Figura 4.11: Campos acústicos en el aula EP/0-26M con mobiliario. 30 puntos de medida

En el caso con mobiliario (figura 4.11), la distancia de cruce de campos con fuente en esquina es de 8.5 metros, con fuente en el centro es de 4.3 metros. Se han realizado un total de 30 medidas en diferentes puntos.

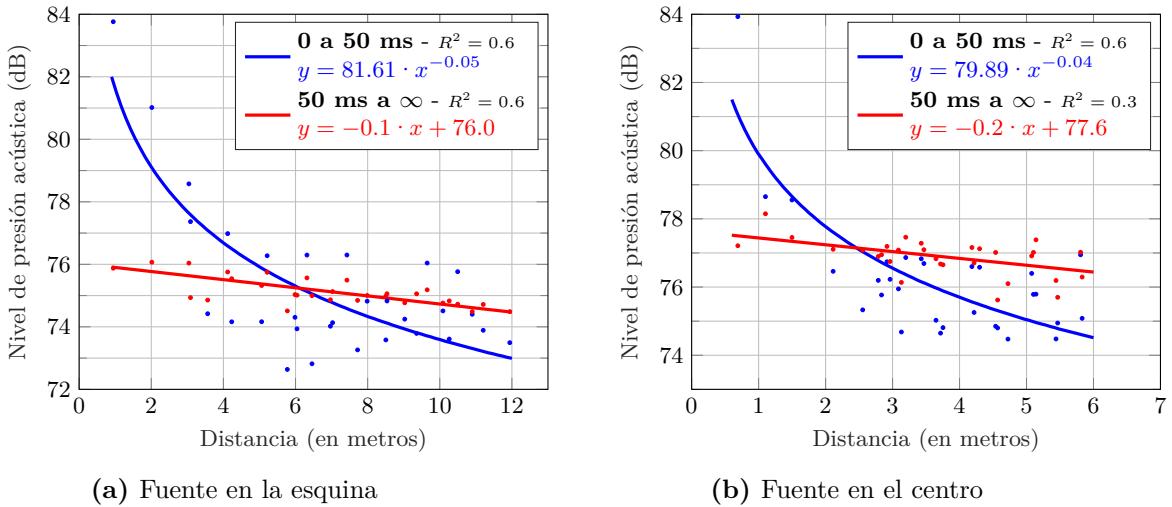


Figura 4.12: Campos acústicos en el aula EP/0-26M sin mobiliario. 30 puntos de medida

En el caso sin mobiliario (figura 4.12), la distancia de cruce de campos con fuente en esquina es de 6.1 metros, con fuente en el centro es de 2.5 metros. Se han realizado un total de 30 medidas en diferentes puntos.

Como se ha podido observar en las figuras 4.11 y 4.12 existe una alta variabilidad en los valores respecto a la distancia dando un ajuste de curva muy bajo en general. Esta variabilidad puede ser producida por:

- El efecto de focalizaciones debido a la reflexiones de las ventanas (ocupan un 33% de una de las paredes).
- Por la aparición de modos propios. La frecuencia límite (ecuación 2.31) es de 154 Hz para el recinto con mobiliario y de 162 sin él, una pequeña parte del espectro total (125 Hz a 8 kHz) por tanto no debería afectar al nivel de presión acústica global.

Aún así se debería analizar espacialmente pero no es posible obtener resultados fiables debido a que la distancia entre puntos de medida en el eje X es de 1 metro, en el eje Y de 3 metros aproximadamente y en el eje Z tan sólo hay un punto a 1.2 metros de altura, para analizar la existencia de modos se necesitan al menos una distancia entre puntos de $\lambda/4$. Con la distancia de puntos actual sólo se puede analizar hasta la frecuencia de 86 Hz en el eje X y hasta 28 Hz en el eje Y, en el eje Z al tener sólo un punto de medida no se puede analizar este comportamiento, por lo que si existe una respuesta modal no es posible confirmarla con los datos que se han obtenido actualmente, sería necesario aumentar los puntos de medida.

Se puede observar claramente en los mapas de nivel de presión acústica de los campos perjudiciales (4.15 y 4.16) la razón de la alta variabilidad de los niveles respecto a la distancia.

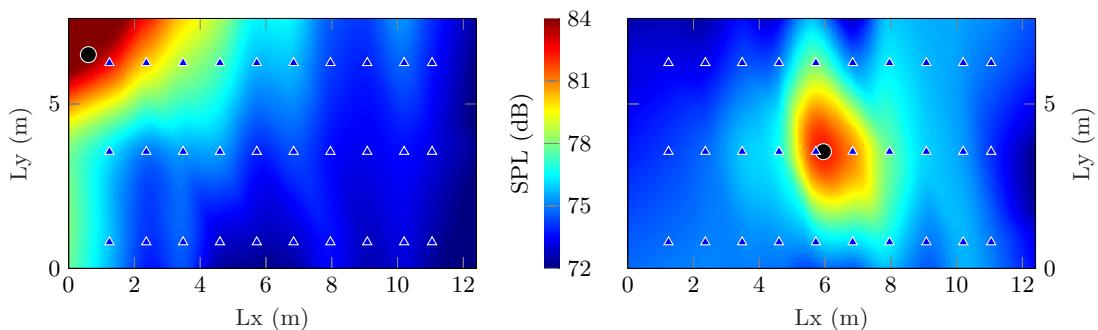


Figura 4.13: Campos útiles (0 a 50 ms) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos)

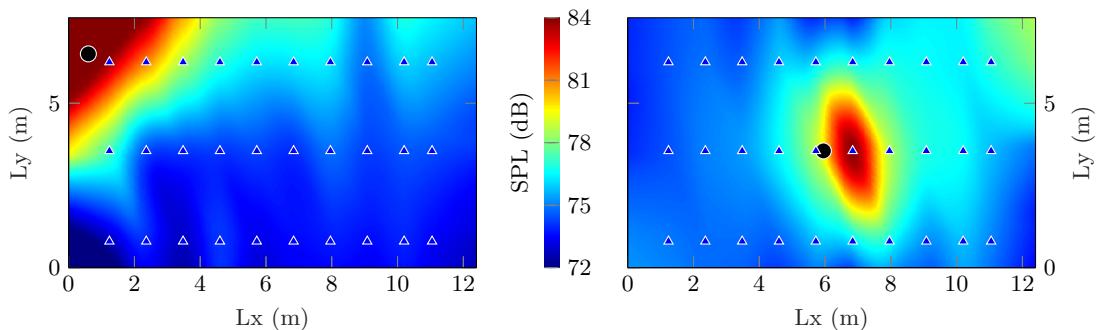


Figura 4.14: Campos útiles (0 a 50 ms) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos)

En las figuras 4.13 y 4.14 se muestran los mapas del campo útil con y sin mobiliario, el comportamiento es muy similar en ambos teniendo un mayor nivel en ciertas zonas cuando se retira el mobiliario. En los mapas se producen algunos artefactos en la zona de extrapolación (abarcá desde los puntos de medida hasta los límites del recinto), sobretodo es notable en la esquina superior izquierda del aula sin mobiliario y fuente en el centro.

En los mapas de campo perjudicial (figuras 4.15 y 4.16) es donde se aprecia la razón de los valores tan bajos en el ajuste de las curvas anteriores. En todos los mapas de campo perjudicial, que contienen la mayoría de la energía acústica en términos temporales, se obtienen niveles muy variantes respecto a la distancia a la fuente. El comportamiento es muy similar a un campo estacionario en un tubo cerrado, comportamiento estudiado inicialmente en Kundt (1866) y Kundt (1868), donde la energía acústica se mantiene estacionaria a lo largo de éste. Con la fuente en la esquina este efecto es menor que con la fuente en el centro debido a que, si la fuente no está equidistanciada de los planos de las paredes, no puede formar campos estacionarios o focalizaciones tan acusadas como se producirían con la fuente posicionada en el centro.

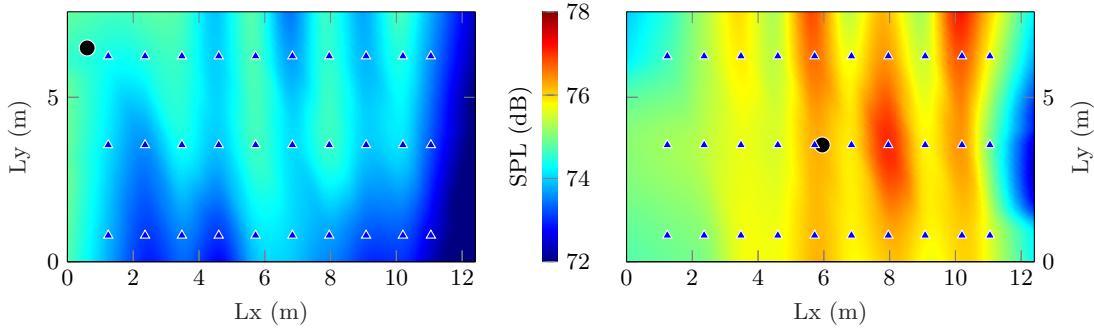


Figura 4.15: Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M con mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos)

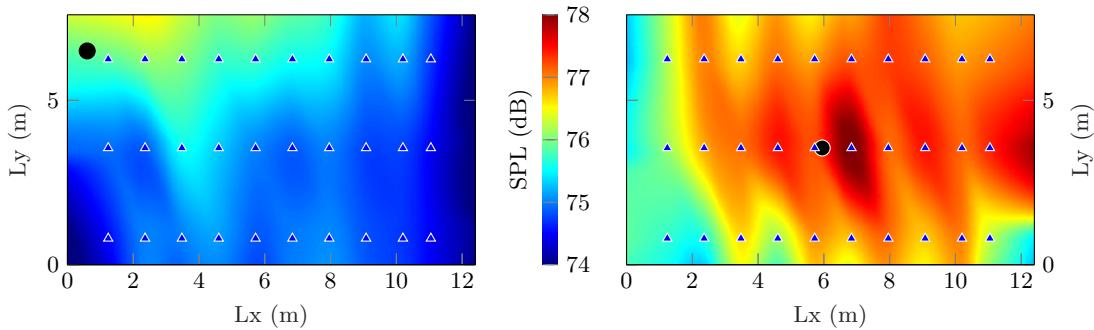


Figura 4.16: Campos perjudiciales (50 ms a ∞) para ambas posiciones de fuente en el aula EP/0-26M sin mobiliario. Las fuentes (círculos) y los 30 puntos de medida (triángulos)

Se ha analizado por bandas de octava este comportamiento intentando poder confirmar las causas por las que se está produciendo la alta variabilidad del nivel de presión acústica y no

se puede confirmar a ciencia cierta debido a lo comentado anteriormente. En la figura 4.17 se puede observar que en diferentes bandas de frecuencias el comportamiento es el mismo que con el nivel global, aparecen máximos y mínimos a una distancia media aproximada entre máximos de 2 metros en todas las bandas, que se podría concluir que es debido a posibles focalizaciones del sonido pero sin una mayor resolución de los puntos de medida es imposible confirmarlo.

Sería necesario volver a realizar mediciones en el aula EP/0-26M aumentando los puntos de medida, al menos en algunas zonas realizar medidas cada 0.17 metros con tres mallados de 4x4 puntos en los planos XY, XZ y YZ para obtener información fiable hasta los 500 Hz y comprobar si se mantiene el comportamiento obtenido en las medidas anteriores. Una vez realizado si la información no es concluyente se debe reducir la distancia entre puntos hasta los 0.02 metros correspondientes a $\lambda/4$ de la frecuencia de 4 kHz y confirmar finalmente el comportamiento de los campos acústicos en el interior del recinto.

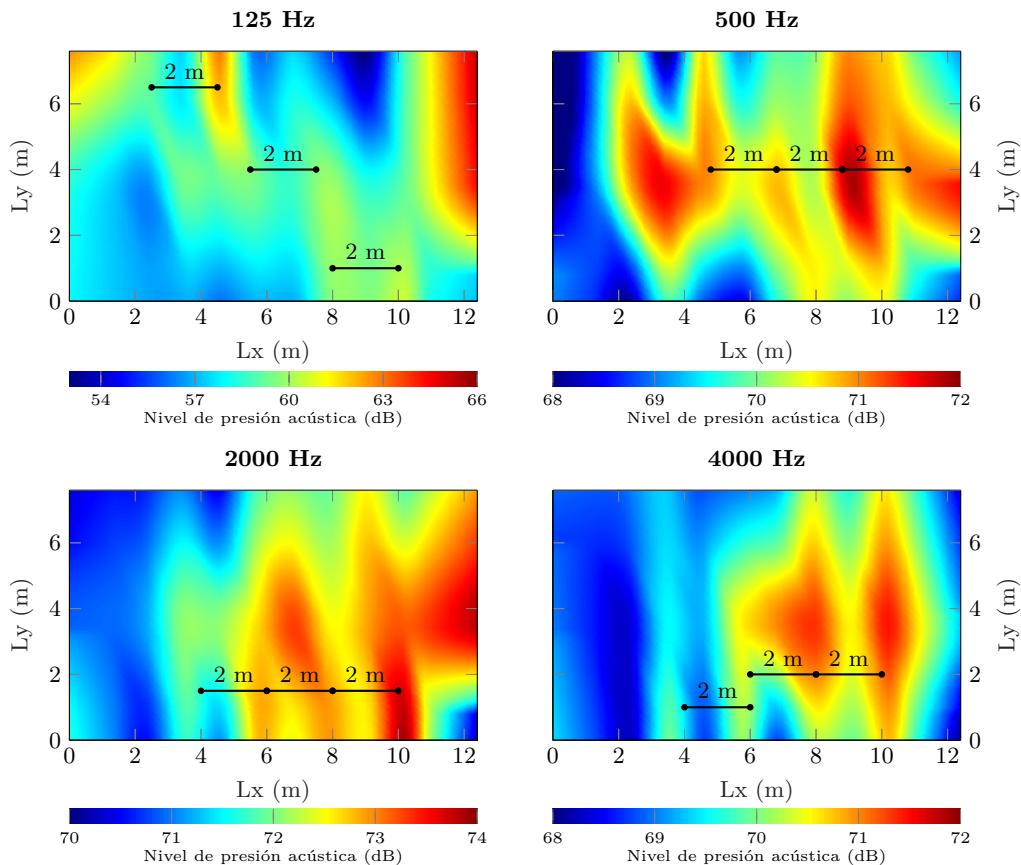


Figura 4.17: Campos perjudiciales en las bandas de 125 Hz, 500 Hz, 2 kHz y 4kHz con la fuente en el centro en el aula EP/0-26M sin mobiliario.

4.2. Validación de modelos

Se han desarrollado modelos de simulación en dos programas, CATT-Acoustic (versión 8) y EASE (versión 4.4). Para validar estos modelos se han seguido los siguientes pasos:

1. Los valores de absorción de los materiales introducidos son los que están disponibles en la literatura.
2. Despues de la primera simulación y obtener los tiempos de reverberación por bandas de octava se han ajustado los valores de absorción para obtener tiempos de reverberación similares a los recintos reales con una desviación máxima de 0.05 segundos en el caso del recinto sin mobiliario y de 0.1 segundos con mobiliario.
3. Una vez ajustados los tiempos se han obtenido los datos de los rayos acústicos simulados e integrado del mismo modo que en las medidas in situ.
4. Se han generado las curvas de campo útil y campo perjudicial del mismo modo que en los recintos reales y se han comparado para determinar la validez o no del modelo.

A la hora de comparar las curvas entre las medidas in situ y los modelos se modificarán los valores absolutos de las curvas in situ para igualar los niveles. Teniendo en cuenta las ecuaciones de las curvas:

$$y_{\text{útil}} = a \cdot x^b + L_{\text{corrección}}$$

$$y_{\text{perjudicial}} = m \cdot x + n + L_{\text{corrección}}$$

Donde: $L_{\text{corrección}}$ → Es el nivel para corregir la diferencia de los niveles absolutos.

Esta corrección es necesaria para comparar fácilmente las curvas. No modifica la relación entre campo útil y perjudicial de las medidas in situ ya que aumenta o reduce el nivel de ambas por igual.

Tanto para el caso de CATT-Acoustic como en EASE se ha desechado la opción de utilizar las respuestas al impulso como sí se ha utilizado en las medidas in situ debido a que estos programas no mantienen la relación respecto a la distancia emisor-receptor, imposibilitando obtener los campos acústicos analizados en este trabajo.

También se han desarrollado varios programas para la obtención, procesado y cálculo de los datos que se detallan en el anexo A.

Los cálculos se han realizado un mínimo de 4 veces para todos los casos para observar posibles variaciones en los resultados, sobretodo en los recintos con mobiliario, y verificar la estabilidad de los mismos.

4.2.1. CATT-Acoustic

Para obtener la historia temporal del trazado de rayos acústicos con CATT-Acoustic es necesario activar la función oculta en el archivo *hiddenoptions.txt* (más información en el manual de CATT-Acoustic). Esta opción está diseñada para generar la historia temporal únicamente hasta las primeras reflexiones, aunque es posible obtener más información cambiando algunos ajustes.

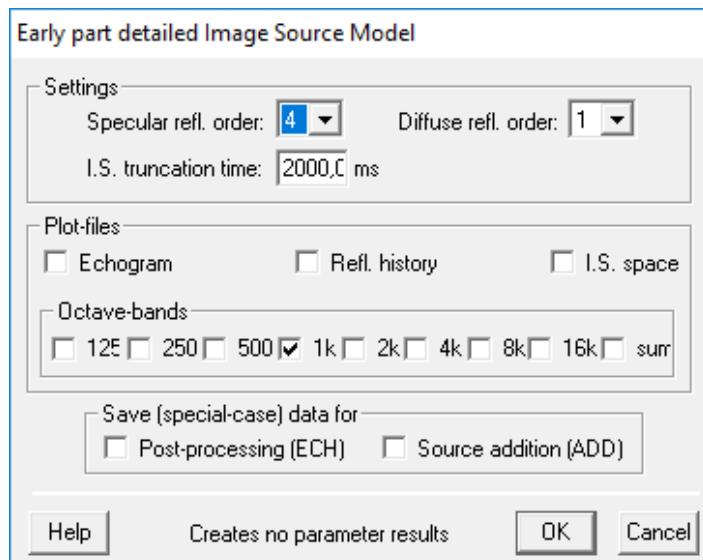


Figura 4.18: Ventana de parámetros para el trazado de rayos en CATT-Acoustic.

En las opciones se permite elegir hasta un máximo de 9 reflexiones (*Specular reflection order*), es decir, cada rayo emitido se sigue calculando hasta que se produce la novena reflexión y, si en esa última reflexión no impacta con el receptor, se desecha. Además de este límite de reflexión se debe incluir un tiempo máximo de duración del rayo (*Image Source truncation time*), que teniendo en cuenta la información que se quiere extraer (campo directo, campo temprano y campo tardío) es recomendable que sea mayor que el valor del tiempo de reverberación.

Debido a la arquitectura del programa (32 bits) y, seguramente a los algoritmos utilizados (no conocidos), no es posible calcular para recintos como los de este trabajo rayos reflejados más de 4 veces cuando se incluye el mobiliario. Si se retira el mobiliario permite el máximo de 9 reflexiones pero en ninguno de los casos siguientes (apartados 4.2.1.1 y 4.2.1.2) se obtienen más allá de las octavas reflexiones, obteniendo así una reducida densidad de rayos en la historia temporal (recepción de rayos con un espacio temporal grande entre ellos) y tiempo máximo de rayos aproximadamente entre los 300-400 ms (perdiendo toda la cola reverberante o campo tardío).

El programa no ofrece ninguna otra alternativa para analizar los campos acústicos. La opción de obtener la respuesta al impulso en archivo de audio (.wav) para su posterior análisis en el programa dBFA no es viable porque CATT-Acoustic no ofrece los .wav sin normalizar, perdiendo toda referencia con la distancia emisor-receptor.

La historia temporal se obtiene para cada receptor por separado y la tabla de datos¹ (obviando otras informaciones contenidas en el archivo de texto) tiene el siguiente formato:

¹Desde la primera versión de CATT-Acoustic 8, *build 1*, hasta la *build 2.1* el signo decimal es una coma, en versiones posteriores es un punto.

#DATAFIELDS	TYPE	DELAY	ORDER	AZIMUTH	ELEVATION	SPL125	SPL250	SPL500	SPL1K	SPL2K	SPL4K
#DATA											
d	0,0000	0	268,79	87,23	58,7	58,7	58,7	58,7	58,7	58,7	58,6
s	2,2507	1	268,81	123,20	56,4	56,6	56,6	56,5	56,5	56,5	56,5
*	44,8291	1	286,25	94,98	7,6	7,7	7,7	7,6	7,5	7,5	7,2
*	40,7107	1	271,40	95,28	9,7	9,9	9,9	9,8	9,7	9,7	9,4
*	42,0550	1	255,94	95,21	9,0	9,1	9,1	9,0	9,0	8,9	8,6
*	30,3642	1	292,64	96,93	15,7	15,8	15,8	15,7	15,7	15,7	15,4
*	24,4202	1	273,05	97,67	20,3	20,5	20,4	20,4	20,4	20,3	20,1
*	26,4480	1	251,98	97,47	18,5	18,7	18,7	18,6	18,6	18,6	18,4
*	18,7975	1	304,49	100,26	24,3	24,5	24,5	24,4	24,3	24,3	24,2
*	9,2995	1	276,61	102,71	36,9	37,1	37,1	37,0	37,0	37,0	36,9
*	12,9668	1	243,81	101,91	30,8	31,0	31,0	30,9	30,9	30,9	30,7
*	14,0983	1	329,32	105,53	28,2	28,4	28,4	28,3	28,3	28,3	28,1
*	2,9884	1	289,85	118,95	43,8	43,9	43,9	43,9	43,9	43,8	43,8
*	7,1942	1	220,19	112,40	36,7	36,9	36,9	36,8	36,8	36,8	36,7
*	18,3817	1	11,26	107,74	24,6	24,7	24,7	24,7	24,6	24,6	24,5
*	8,5357	1	46,03	134,46	38,1	38,3	38,3	38,2	38,2	38,2	38,1
*	12,1646	1	152,45	118,42	32,0	32,1	32,1	32,1	32,0	32,0	31,9
*	29,6612	1	42,92	103,54	16,1	16,3	16,2	16,2	16,1	16,1	15,9

Figura 4.19: Porción de la tabla de datos de un receptor generada por el trazado de rayos en CATT-Acoustic.

Adelantando los resultados de la validación de modelos, se ha comprobado que el programa CATT-Acoustic (en su versión 8) no permite cálculos detallados, para ello la opción recomendable es EASE.

4.2.1.1. Aula OP/S003

Para la simulación del aula OP/S003 en CATT-Acoustic se han ubicado los puntos de recepción en los mismos lugares que en las medidas in situ, 48 receptores para el caso del aula con mobiliario y 22 sin mobiliario. Las fuentes, una en el centro y otra en la esquina son omnidireccionales con un nivel de presión acústica a 1 metro de 70dB por octava emitiendo ruido rosa.

El tiempo medio de cálculo ha sido:

- Con mobiliario: 6 horas.
- Sin mobiliario: 30 minutos.

El modelo tridimensional con mobiliario y sin él se puede observar en la figura 4.20.

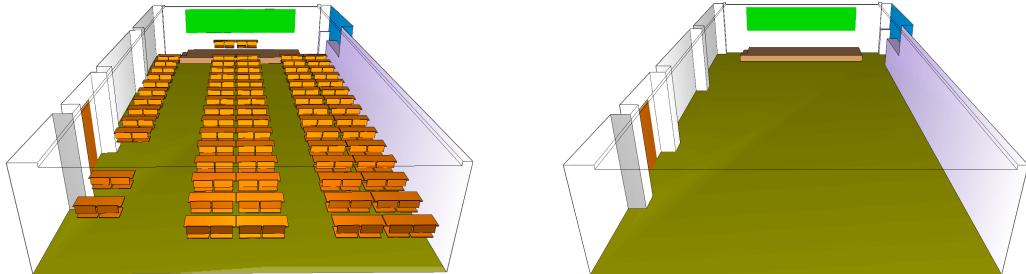


Figura 4.20: Modelos del Aula OP/S003 en CATT-Acoustic.

Los cálculos del tiempo de reverberación por bandas de octava son:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$T30$ Con mobiliario (s)	1.09	1.54	1.72	1.58	1.35	1.28	1.05
$T30$ Sin mobiliario (s)	1.24	1.87	2.10	1.85	1.67	1.62	1.31

Tabla 4.3: Tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic ($T30$ extrapolado).

Comparando con las medidas in situ se obtiene la desviación entre los resultados:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
σ_{T30} Con mobiliario (s)	0.02	0.01	0.01	0.11	0.01	0.01	0.02
σ_{T30} Sin mobiliario (s)	0.03	0.04	0.05	0.01	0.01	0.03	0.01

Tabla 4.4: Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic ($T30$ extrapolado) respecto a los medidos in situ.

Las curvas de los campos acústicos obtenidos se muestran junto a las obtenidas in situ (corrigiendo los niveles de las curvas in situ) en las figuras 4.21 y 4.22.

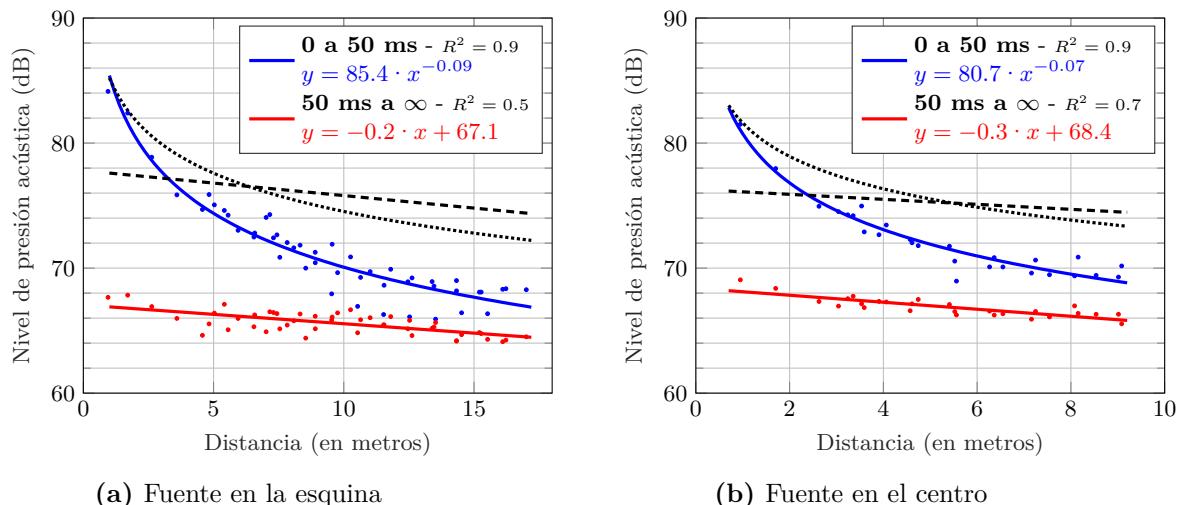


Figura 4.21: Campos acústicos en el aula OP/S003 con mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.

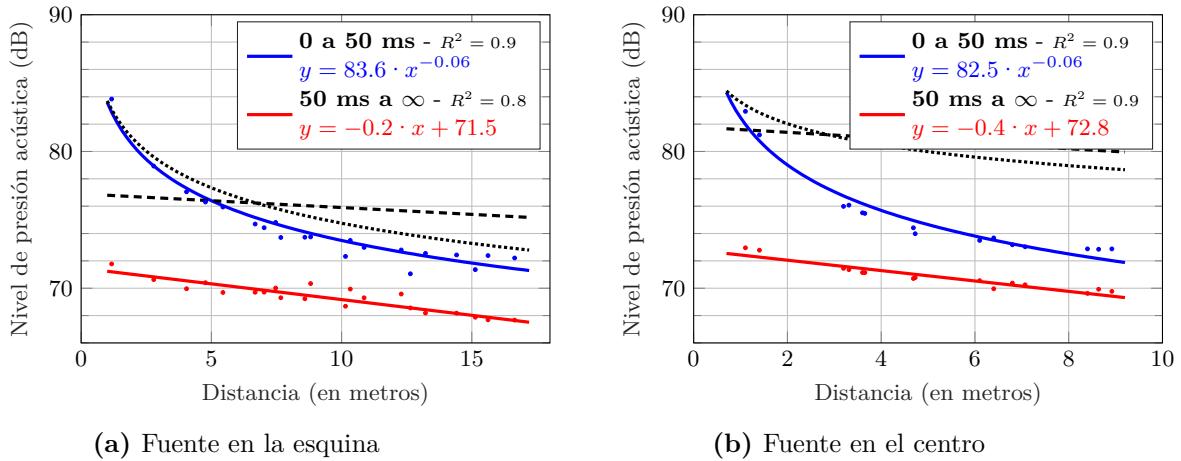


Figura 4.22: Campos acústicos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.

Se puede observar claramente que el campo perjudicial obtenido con CATT-Acoustic es inferior al obtenido in situ, esto es debido a la reducida historia temporal que ofrece este programa por lo que la suma energética de este campo es considerablemente menor al que debería obtenerse.

Las curvas de campo útil obtenidas reducen su energía respecto a la distancia en mayor medida de lo medido in situ, existen diferencias notables a excepción de la fuente en esquina sin mobiliario (figura 4.22a).

4.2.1.2. Aula EP/0-26M

Para la simulación del aula EP/0-26M en CATT-Acoustic se han ubicado los puntos de recepción en los mismos lugares que en las medidas in situ, 30 receptores. Las fuentes, una en el centro y otra en la esquina son omnidireccionales con un nivel de presión acústica a 1 metro de 70dB por octava emitiendo ruido rosa.

El tiempo medio de cálculo ha sido:

- Con mobiliario: 4 horas.
- Sin mobiliario: 20 minutos.

El modelo tridimensional con mobiliario y sin él se puede observar en la figura 4.23.

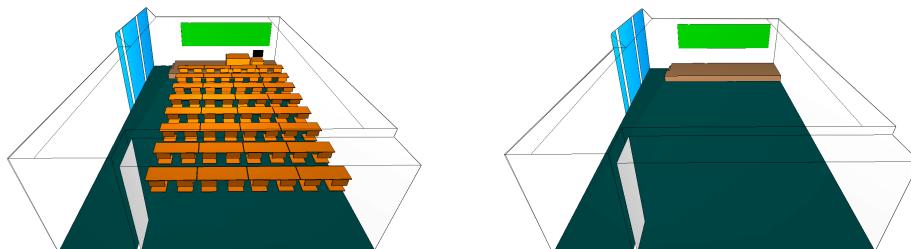


Figura 4.23: Modelos del Aula EP/0-26M en CATT-Acoustic.

Los cálculos del tiempo de reverberación por bandas de octava son:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$T30$ Con mobiliario (s)	1.32	1.46	1.44	1.28	1.15	1.02	0.77
$T30$ Sin mobiliario (s)	1.31	1.56	1.54	1.46	1.31	1.16	0.89

Tabla 4.5: Tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic ($T30$ extrapolado).

Comparando con las medidas in situ se obtiene la desviación entre los resultados:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
σ_{T30} Con mobiliario (s)	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
σ_{T30} Sin mobiliario (s)	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.04

Tabla 4.6: Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante CATT-Acoustic ($T30$ extrapolado) respecto a los medidos in situ.

Las curvas de los campos acústicos obtenidos se muestran junto a las obtenidas in situ (corrigiendo los niveles de las curvas in situ) en las figuras 4.24 y 4.25.

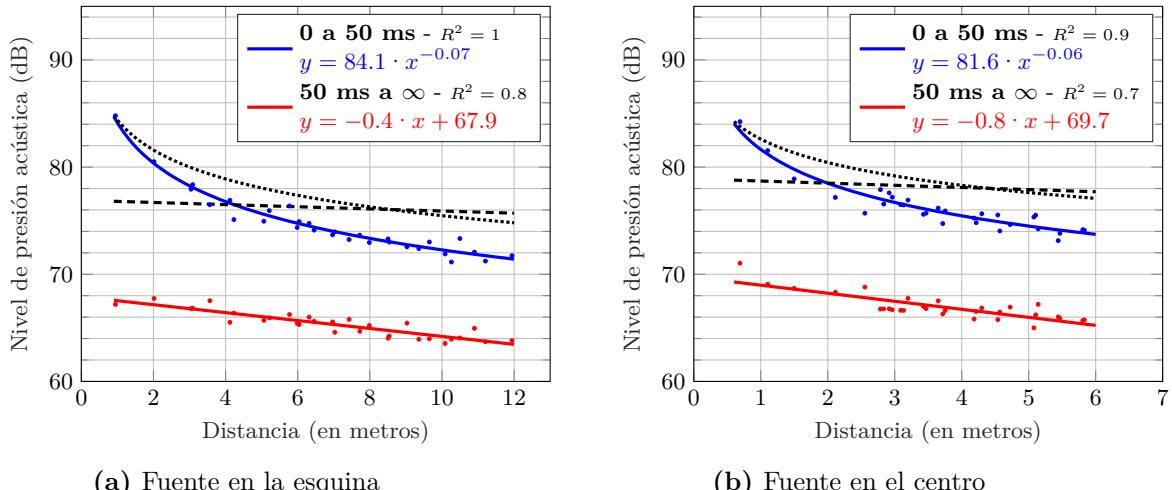


Figura 4.24: Campos acústicos en el aula EP/0-26M con mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.

Al igual que ocurre en el caso del aula OP/S003 (apartado 4.2.1.1) los campos perjudiciales quedan muy por debajo de los medidos in situ y los campos útiles reducen su energía con la distancia en mayor medida que in situ a excepción, al igual que en el otro aula, de la fuente en esquina sin mobiliario (figura 4.25a).

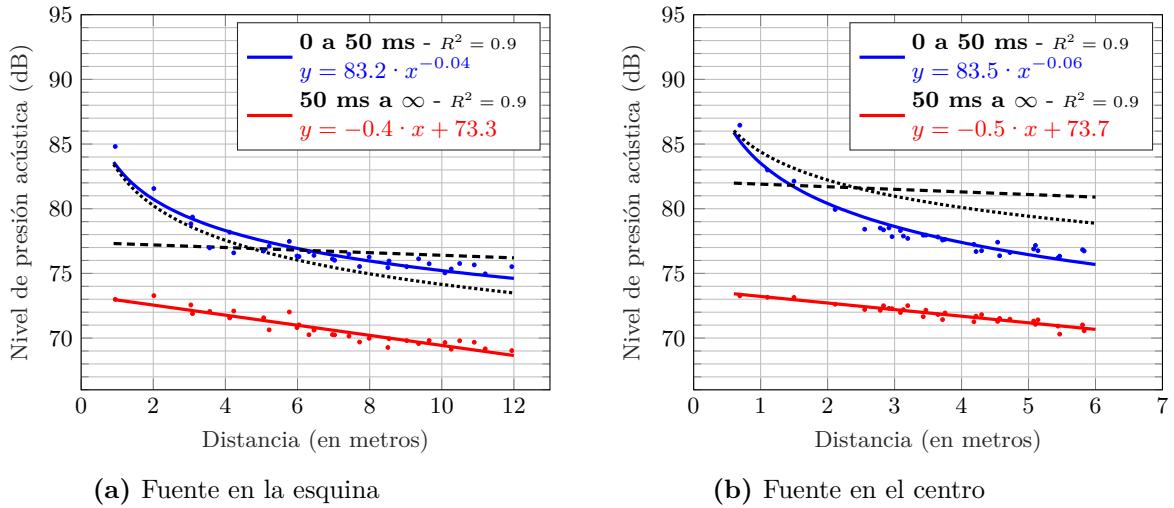


Figura 4.25: Campos acústicos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulado en CATT-Acoustic. Se muestran las curvas in situ (líneas discontinuas) con el nivel global modificado para poder comparar.

4.2.2. EASE

El proceso para obtener la historia temporal con EASE es algo más complejo que en CATT-Acoustic. En primer lugar se debe calcular la respuesta al impulso para después exportar esas respuestas al impulso, una a una, a archivo de texto. Es por ello que se ha desarrollado un robot para automatizar esa exportación a archivo de texto (descrito en el anexo A).

EASE tiene mayor grado de personalización de los parámetros de cálculos y se obtiene la historia temporal completa, no sólo la parte temprana como sucede en CATT-Acoustic.

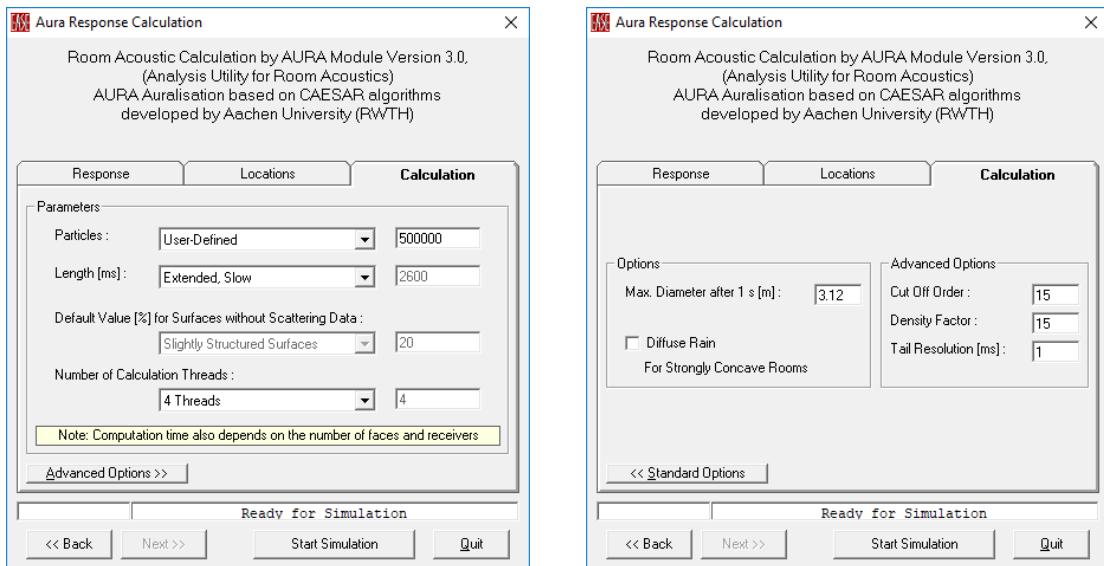


Figura 4.26: Ventanas de parámetros para el cálculo de la respuesta al impulso en EASE.

La primera ventana de opciones permite elegir el número de rayos lanzados (*Particles*), pudiendo reducir o aumentar según las necesidades del recinto, también la duración máxima de cada uno de ellos (*Length*) y por último permite seleccionar una dispersión genérica para los materiales que no la tengan definida (no seleccionable si todos los materiales tienen definida la dispersión) y cuántos núcleos de procesador se van a dedicar al cálculo.

En la segunda ventana de opciones, es posible determinar la precisión del campo temprano modificando el diámetro de una esfera imaginaria alrededor del receptor que captará los rayos acústicos (*Max. Diameter after 1s*), a menor valor mayor precisión del campo temprano. Existe la posibilidad de realizar el cálculo con un algoritmo alternativo (*Diffuse rain*) que a grandes rasgos sustituye el cálculo de los rayos dispersos que originalmente son aleatorios para calcular todos los posibles rayos dispersos que impactaran en cada receptor, es útil para recintos donde la forma de estos recintos producen una fuerte focalización del sonido, en este trabajo no se ha hecho uso de este algoritmo. Las tres últimas opciones definen los parámetros de los rayos: a partir de qué número de reflexiones de cada rayo (*Cut Off Order*) se cambia el método de cálculo de *fuente imagen* a trazado de rayos, la densidad de pulsos por milisegundo para la parte tardía (*Density factor*) y la resolución de la cola reverberante (*Tail resolution*).

Los algoritmos utilizados en EASE (*CAESAR*), que no se conocen internamente, devuelven cálculos con altísima densidad de datos que permiten acercarse a los datos de una medida real. La única limitación (solucionado en la futura versión 5, 2019) es la arquitectura de 32 bits y la imposibilidad de utilizar más de 1GB de memoria RAM aunque, como se verá a continuación, es suficiente para obtener buenos resultados.

La historia temporal, obtenida por separado para cada receptor, tiene el siguiente formato una vez exportado a archivo de texto:

Number of Reflections		47489									
No.	Time/Delay	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
0	26.6124	50.78	50.78	50.77	50.77	50.76	50.76	50.75	50.75	50.74	
1	27.0292	10.77	0.00	0.00	7.33	12.23	11.60	0.00	4.00	9.16	6.35
2	27.3119	18.75	0.00	0.00	15.32	20.22	19.59	0.00	11.99	17.14	14.33
3	27.3313	19.15	0.00	0.00	15.71	20.61	19.98	0.00	12.38	17.54	14.73
4	27.3509	19.15	0.00	0.00	15.71	20.61	19.98	0.00	12.38	17.54	14.73
5	27.3692	19.15	0.00	0.00	15.71	20.61	19.98	0.00	12.38	17.54	14.73
6	27.4150	19.23	0.00	0.00	15.80	20.70	20.07	0.00	12.47	17.62	14.81
7	27.5836	19.24	0.00	0.00	15.81	20.71	20.08	0.00	12.48	17.63	14.82
8	27.5879	49.78	49.78	49.84	49.90	49.95	49.95	49.94	49.94	49.92	49.90
9	27.6054	19.24	0.00	0.00	15.82	20.71	20.08	0.00	12.50	17.64	14.83
10	27.6596	19.24	0.00	0.00	15.82	20.71	20.08	0.00	12.50	17.64	14.83
11	27.6813	19.24	0.00	0.00	15.82	20.71	20.08	0.00	12.50	17.64	14.83
12	27.9176	47.72	47.72	47.74	47.77	47.79	47.77	47.74	47.72	47.55	47.38
13	27.9652	20.00	0.00	0.00	18.74	21.89	21.66	0.00	18.09	19.32	17.71
14	27.9715	20.00	0.00	0.00	18.74	21.89	21.66	0.00	18.09	19.32	17.71
15	28.0859	19.67	16.66	17.18	20.17	22.04	22.12	16.80	21.62	19.72	19.16
16	28.1306	19.67	16.66	17.18	20.17	22.04	22.12	16.80	21.62	19.72	19.16
17	28.1553	20.03	19.13	19.65	21.24	22.58	22.81	19.27	23.19	20.44	20.22

Figura 4.27: Porción de la tabla de datos de un receptor generada por el trazado de rayos en EASE.

Estos serán finalmente los modelos elegidos para la elaboración del trabajo.

4.2.2.1. Aula OP/S003

Para la simulación del aula OP/S003 en EASE se han ubicado los puntos de recepción en los mismos lugares que en las medidas in situ, 48 receptores para el caso del aula con mobiliario y 24 sin mobiliario, añadiendo 2 receptores para completar el mallado de medida. Las fuentes, una en el centro y otra en la esquina son omnidireccionales con un nivel de

presión acústica a 1 metro de 70dB por tercio de octava emitiendo ruido rosa.

El tiempo medio de cálculo ha sido:

- Con mobiliario: 16 horas.
- Sin mobiliario: 2 horas.

El modelo tridimensional con mobiliario y sin él se puede observar en la figura 4.28.

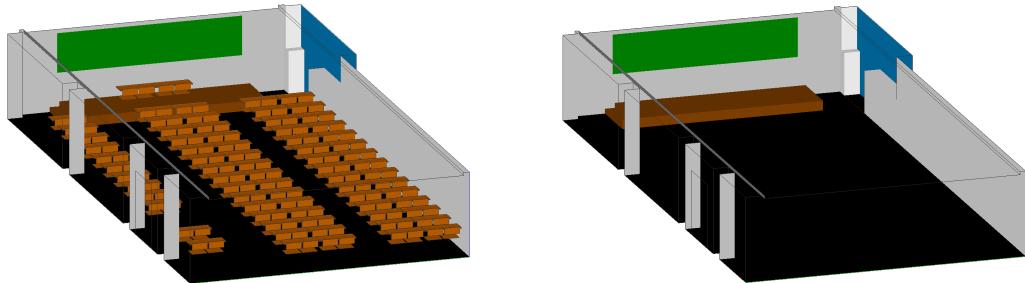


Figura 4.28: Modelos del Aula EP/0-26M en EASE.

Los cálculos del tiempo de reverberación por bandas de octava son:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{30} Con mobiliario (s)	1.20	1.64	1.78	1.50	1.29	1.31	1.03
T_{30} Sin mobiliario (s)	1.19	1.84	1.98	1.84	1.65	1.68	1.30

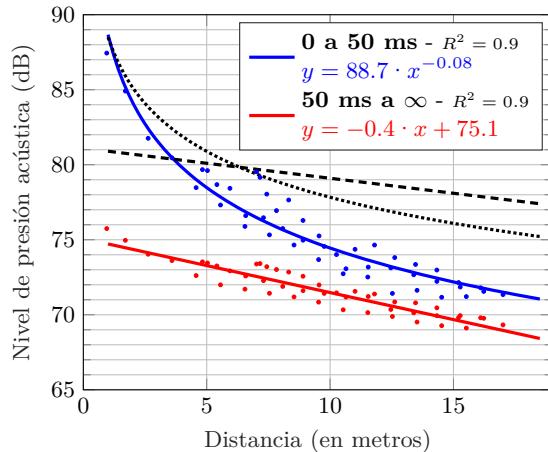
Tabla 4.7: Tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T_{30} extrapolado).

Comparando con las medidas in situ se obtiene la desviación entre los resultados:

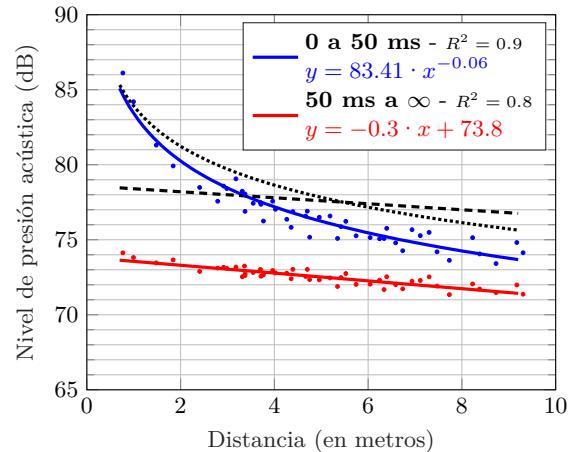
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\sigma_{T_{30}}$ Con mobiliario (s)	0.06	0.06	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01
$\sigma_{T_{30}}$ Sin mobiliario (s)	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00

Tabla 4.8: Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula OP/S003 por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T_{30} extrapolado) respecto a los medidas in situ.

Las curvas de los campos acústicos obtenidos se muestran junto a las obtenidas in situ (corrigiendo los niveles de las curvas in situ) en las figuras 4.29 y 4.30.

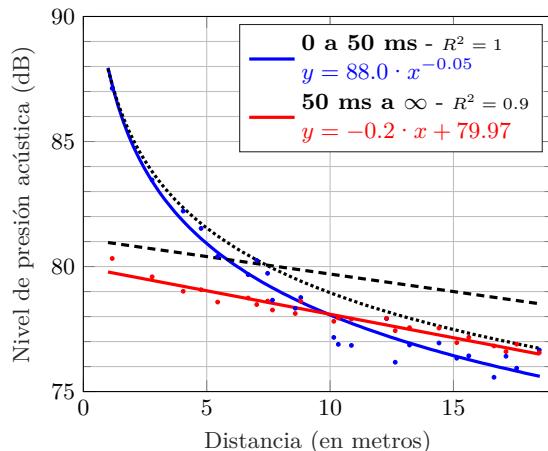


(a) Fuente en la esquina

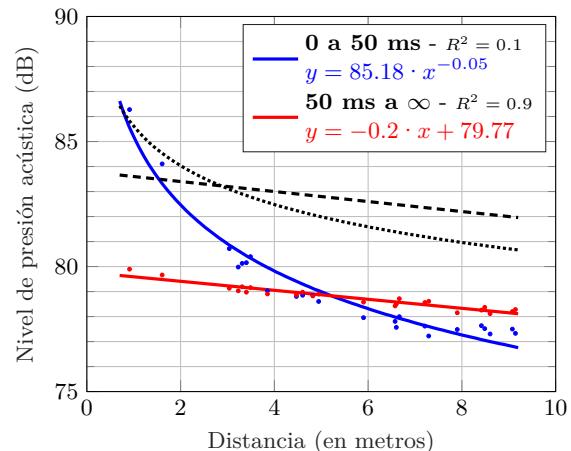


(b) Fuente en el centro

Figura 4.29: Campos acústicos en el aula OP/S003 con mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.



(a) Fuente en la esquina



(b) Fuente en el centro

Figura 4.30: Campos acústicos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.

Los resultados con mobiliario tienen los mismos problemas observados en CATT-Acoustic, el hecho de introducir un gran número de planos (mobiliario) produce que la mayoría de los rayos reflejados se eliminan antes de alcanzar un receptor, reduciendo la densidad de datos resultante y por tanto obteniendo menor energía, sobretodo en el campo perjudicial.

En el caso sin mobiliario con fuente en la esquina es muy similar a los resultados obtenidos en las medidas in situ, aunque con la fuente en el centro la energía es mucho menor.

4.2.2.2. Aula EP/0-26M

Para la simulación del aula EP/0-26M en EASE se han ubicado los puntos de recepción en los mismos lugares que en las medidas in situ, 30 receptores. Las fuentes, una en el centro y otra en la esquina son omnidireccionales con un nivel de presión acústica a 1 metro de 70dB por tercio de octava emitiendo ruido rosa.

El tiempo medio de cálculo ha sido:

- Con mobiliario: 4 horas.
- Sin mobiliario: 2 horas.

El modelo tridimensional con mobiliario y sin él se puede observar en la figura 4.31.

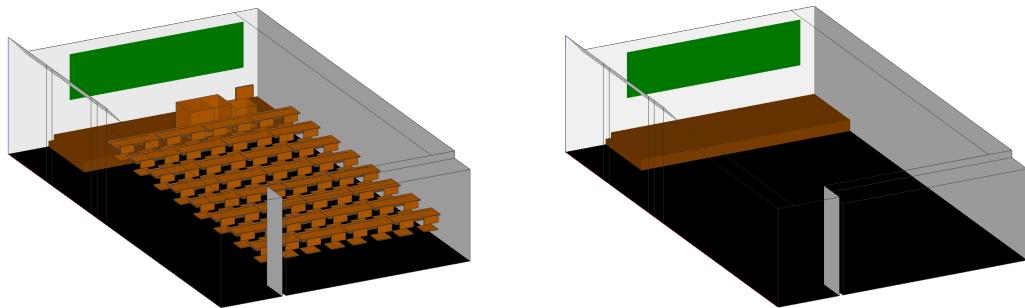


Figura 4.31: Modelos del Aula EP/0-26M en EASE.

Los cálculos del tiempo de reverberación por bandas de octava son:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{30} Con mobiliario (s)	1.25	1.35	1.42	1.32	1.09	0.95	0.82
T_{30} Sin mobiliario (s)	1.35	1.59	1.57	1.45	1.32	1.16	0.84

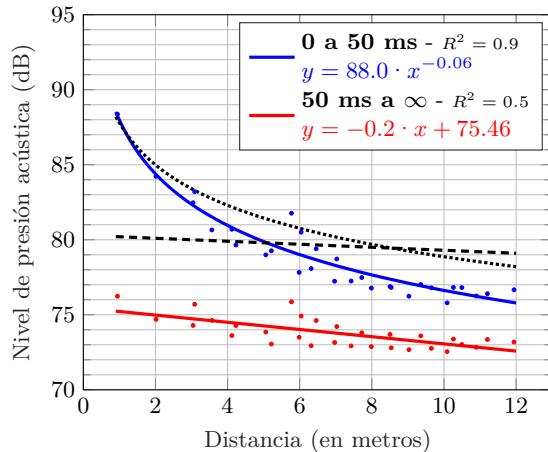
Tabla 4.9: Tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T_{30} extrapolado).

Comparando con las medidas in situ se obtiene la desviación entre los resultados:

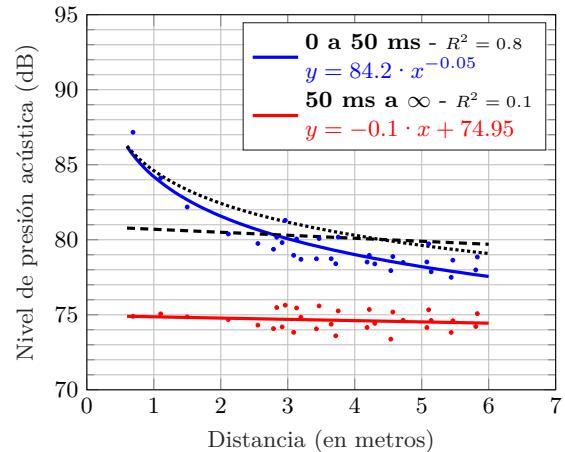
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\sigma_{T_{30}}$ Con mobiliario (s)	0.06	0.11	0.02	0.03	0.06	0.07	0.04
$\sigma_{T_{30}}$ Sin mobiliario (s)	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00

Tabla 4.10: Desviación de los tiempos de reverberación calculados en el aula EP/0-26M por banda de octava, con y sin mobiliario mediante EASE (T_{30} extrapolado) respecto a los medidos in situ.

Las curvas de los campos acústicos obtenidos se muestran junto a las obtenidas in situ (corrigiendo los niveles de las curvas in situ) en las figuras 4.32 y 4.33.

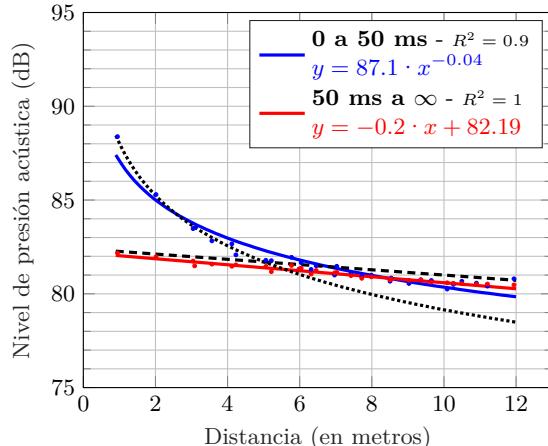


(a) Fuente en la esquina

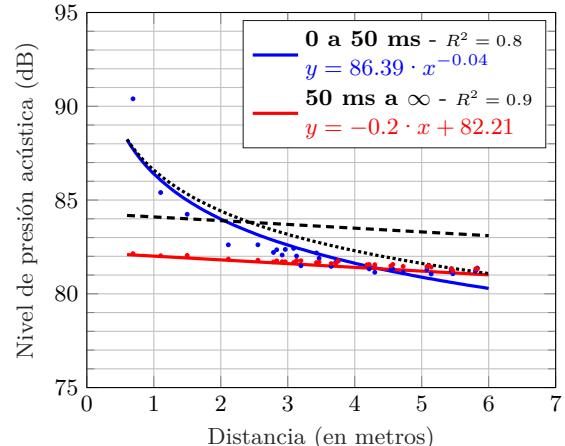


(b) Fuente en el centro

Figura 4.32: Campos acústicos en el aula EP/0-26M con mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.



(a) Fuente en la esquina



(b) Fuente en el centro

Figura 4.33: Campos acústicos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulado en EASE. Se muestran las curvas in situ (negro) con el nivel global modificado para poder comparar.

Como en todos los modelos, cuando se incluye el mobiliario el campo perjudicial queda muy por debajo de lo obtenido en las medidas in situ. En cambio, en los cálculos sin mobiliario con la fuente en la esquina son muy similares a las medidas in situ, con la fuente en el centro el campo directo es similar a las medidas in situ pero el perjudicial queda ligeramente por debajo.

4.3. Selección de modelos

En el apartado anterior se han visualizado los resultados de cada uno de los modelos, pudiendo eliminar las opciones que distan mucho de las medidas in situ. En primer lugar se ha observado que, a simple vista, CATT-Acoustic no se ajusta a los resultados buscados, por lo que ningún modelo realizado con CATT-Acoustic se utilizará en este trabajo.

En las simulaciones con EASE se han obtenido resultados correctos en los casos sin mobiliario, para confirmar la validez de estos modelos a continuación se muestran de nuevo las curvas anteriores añadiendo la información de errores producidos en la regresión de las curvas de los modelos. Las figuras 4.34 y 4.35 muestran los detalles de los campos acústicos del aula OP/S003, y las figuras 4.36 y 4.37 muestran los detalles de los campos acústicos del aula EP/0-26M.

La primera condición para que las curvas obtenidas mediante simulación sean consideradas iguales a las curvas de las medidas in situ es que, dentro del margen de error de las curvas simuladas se encuentren las curvas de las medidas in situ o, en su defecto, que dentro de ese margen se encuentren los márgenes de error de las curvas in situ. La segunda condición, cuando la primera no se cumple, es que la diferencia máxima entre curvas no supere el 5% del valor de alguna de ellas, es decir, un nivel de confianza del 95%.

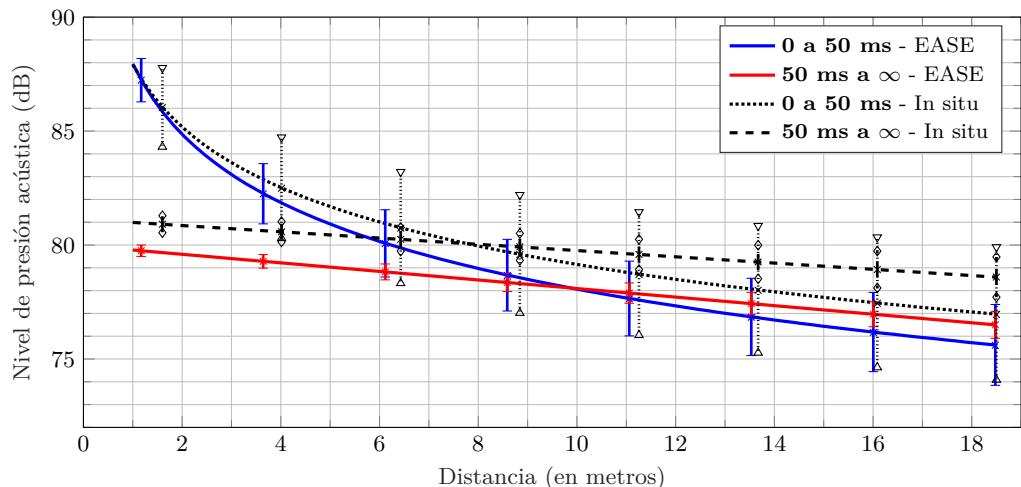


Figura 4.34: Verificación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE.

En el aula OP/S003 sin mobiliario y fuente en la esquina (figura 4.34), la curva del campo útil simulado se encuentra dentro del margen de error de la curva simulada, por el contrario, la curva del campo perjudicial no se encuentra dentro del margen de error ni de la suma de los márgenes de simulación e in situ, hay una diferencia aproximada menor a 1 dB (<5%) entre ambas curvas. En conclusión, aún teniendo la diferencia aproximada de 1 dB en el campo perjudicial, estas curvas se pueden considerar iguales.

Siguiendo en el caso del aula OP/S003 sin mobiliario pero ahora con fuente en el centro (figura 4.35), la curva del campo útil en general se encuentra dentro de la suma de los márgenes de error de simulación e in situ. El campo perjudicial queda aproximadamente 2

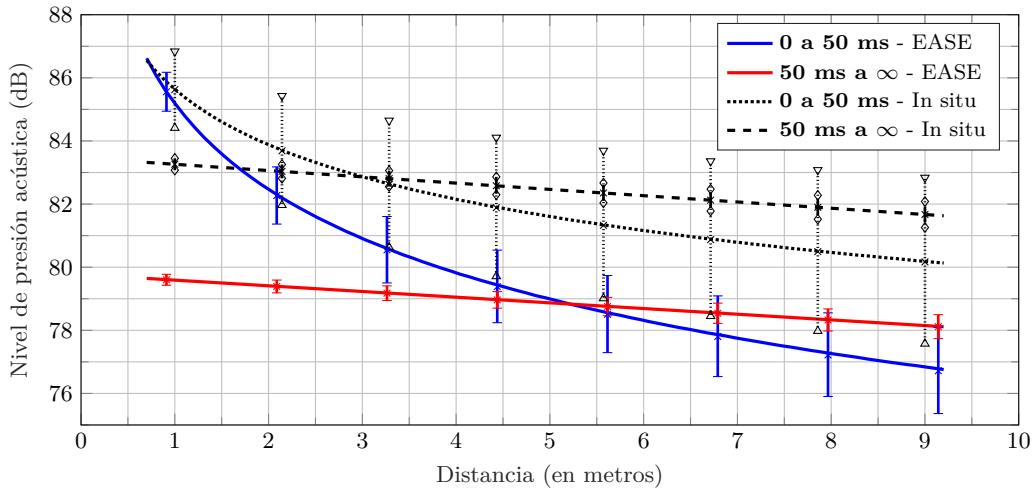


Figura 4.35: Verificación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE.

dB por debajo de lo esperado sin superar el margen del 5%, por lo que las curvas se consideran iguales.

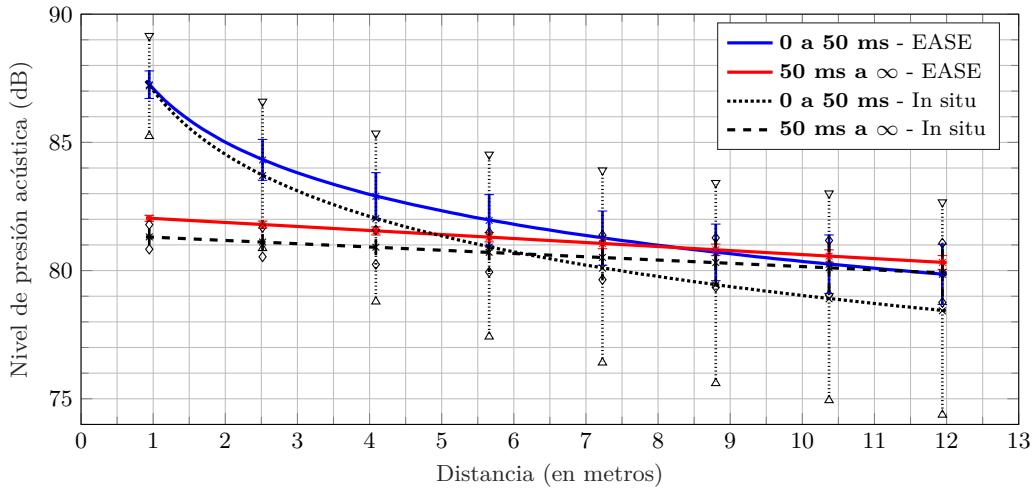


Figura 4.36: Verificación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE.

En el aula EP/0-26M sin mobiliario y con fuente en la esquina (figura 4.36) tanto la curva útil como la perjudicial se encuentran dentro de los márgenes de error, por lo que ambas curvas se consideran iguales.

Siguiendo en el caso del aula EP/0-26M sin mobiliario pero esta vez con fuente en el centro (figura 4.37), el campo útil in situ se encuentra dentro del margen de error de la curva simulada y el campo perjudicial simulado tiene una diferencia aproximada menor a 2 dB (<5%) por lo que las curvas se consideran iguales.

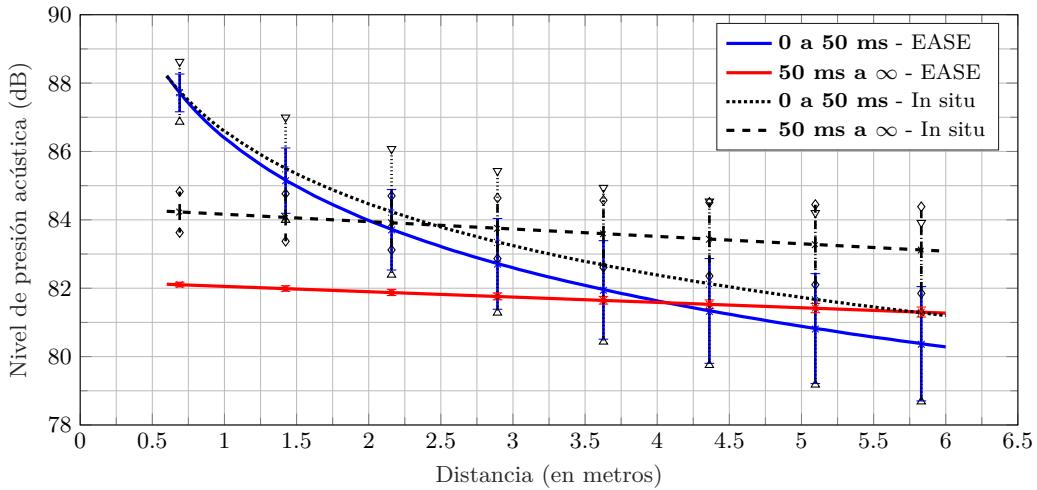


Figura 4.37: Verificación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE.

Se puede concluir con seguridad que los modelos de las aulas EP/0-26M y OP/S003 sin mobiliario del programa EASE han sido validados y pueden utilizarse para tomarlos como medidas reales.

4.4. Obtención de coeficientes

Para obtener los coeficientes de la teoría revisada corregida (sección 2.4.3) se ajustan mediante regresión las ecuaciones de los campos a los campos obtenidos con la simulación. Además de obtenerlos para los modelos validados en la sección anterior, se va a modificar las dimensiones de los recintos (manteniendo el resto de características del recinto) para obtener una relación de los coeficientes y las dimensiones del recinto. En estos casos se va a suponer que los modelos van a mantener su validez aunque sean redimensionados y así tener los campos y los coeficientes para recintos de mayor y de menor tamaño.

4.4.1. Escalado de los recintos

El escalado de los recintos en la simulación se va a aplicar a todas las dimensiones de éstos y por tanto mantendrá su factor de forma. El escalado partirá de un factor de 0.5 (mitad de las dimensiones) hasta 2.0 (doble de las dimensiones) en incrementos de 0.1.

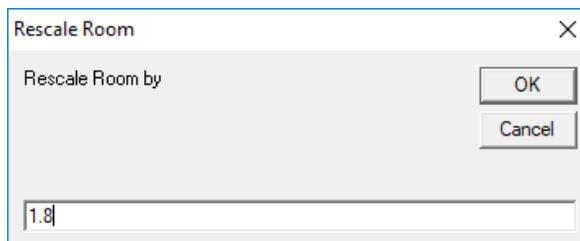


Figura 4.38: Ventana para modificar la escala del recinto en EASE.

Una vez escalado el recinto se simulará para obtener las curvas de los campos útil y perjudicial y ajustar a éstos las curvas de la teoría revisada corregida (sección 2.4.3) para obtener los coeficientes de ajuste (apartado 4.4.2).

Los coeficientes obtenidos mediante el escalado y posterior ajuste se muestran en tablas relacionándolos con las dimensiones del recinto y el tiempo de reverberación en el capítulo de resultados y, en el anexo B, se encuentran todos los datos de cálculo.

4.4.2. Método de obtención de coeficientes

En el programa EASEPostFile2Matlab (sección A.2) se puede realizar todo el proceso de obtención de los coeficientes a partir de los datos obtenidos con EASE.

Los coeficientes se obtienen ajustando mediante regresión las ecuaciones de la teoría revisada corregida (sección 2.4.3) con las curvas de los campos acústicos obtenidos con EASE, en concreto se obtienen los 3 campos acústicos (directo, primeras reflexiones y cola reverberante). A continuación se muestran los códigos que realizan la regresión:

Campo directo:

Código 4.1: Líneas de código Matlab para obtener coeficientes de la teoría revisada corregida del campo directo.

```
% Parámetros de la regresión
fD = fittype('Fac * W*Q./(4*pi*dist.^2)*Cd',... % Ecuación de campo directo
    'dependent',{'y'},... % Curva de campo directo EASE
    'independent',{'dist'},... % Vector de distancia
    'problem', {'Q','W','Fac'},... % Constantes
    'coefficients',{'Cd'}); % Coeficiente

% Regresión
[fitiD,gofD,outputD] = fit(Distplot',10.^(Dplot'/10),fD,'problem',{Q,W,Fac})
```

Campo tardío o cola reverberante:

Código 4.2: Líneas de código Matlab para obtener coeficientes de la teoría revisada corregida del campo tardío.

```
% Parámetros de la regresión
fL = fittype('Fac * (4*W)/(S*(-log(1-alpha))) * exp(-(13.82*(dist/c+t)*el/T)) * Cl',... % Ecu. campo tardío
    'dependent',{'y'},... % Curva de campo tardío EASE
    'independent',{'dist'},... % Vector de distancia
    'problem', {'W','S','alpha','t','T','c','Fac'},... % Constantes
    'coefficients',{'el','Cl'}); % Coeficientes

% Regresión
[fitiL,gofL,outputL] = fit(Distplot',10.^(Pplot'/10),fL,'problem',{W,S,alpha,t,T,c,Fac});
```

Primeras reflexiones:

Código 4.3: Líneas de código Matlab para obtener coeficientes de la teoría revisada corregida del campo temprano.

```
% Parámetros de la regresión
fE = fittype('Fac * ((4*W)./(S*(-log(1-alpha))*dist) .* (exp(-(13.82*(dist/c)*ee/T))*Ce - exp(-(13.82*(
    ↪ dist/c+t)*el/T)) * Cl)',... % Ecuación de primeras reflexiones
    'dependent',{'y'},... % Curva de primeras reflexiones EASE
    'independent',{'dist'},... % Vector de distancia
    'problem', {'W','S','alpha','t','c','Fac','el','Cl'},... % Constantes
    'coefficients',{'ee','Ce'}); % Coeficientes

% Regresión
[fitiE,gofE,outputE] = fit(Distplot',10.^(Eplot'/10),fE,'problem',{W,S,alpha,T,t,c,Fac,fitiL.el,fitiL.Cl});
```

Las variables vistas en los códigos anteriores corresponden a los siguientes parámetros:

- **Distplot, Dist:** Vector de distancia desde la distancia del receptor más cercano hasta el más lejano en incrementos de 0.01 metros.
- **Dplot, Pplot, Eplot:** Son las curvas de los campos directo, tardío y temprano en decibelios obtenido con EASE.
- **y:** Es el campo en lineal al que debe ajustarse la ecuación.
- **Fac:** es el factor Z/p_0^2 que multiplica a la ecuación de la curva para obtenerla directamente en valores de presión acústica.
- **W, Q:** Son la potencia y directividad de la fuente.
- **t:** Es el periodo de integración temporal, 0.05 s.
- **alpha, T, c, S:** El resto de parámetros que corresponden respectivamente a: coeficiente medio de absorción, tiempo de reverberación de Eyring, velocidad del sonido y superficie del recinto.

Los coeficientes y ecuaciones se encuentran en las variables *fitiD*, *fitiL* y *fitiE* y la información de la regresión (valor de ajuste, etc) en *gofD*, *gofL* y *gofE*.

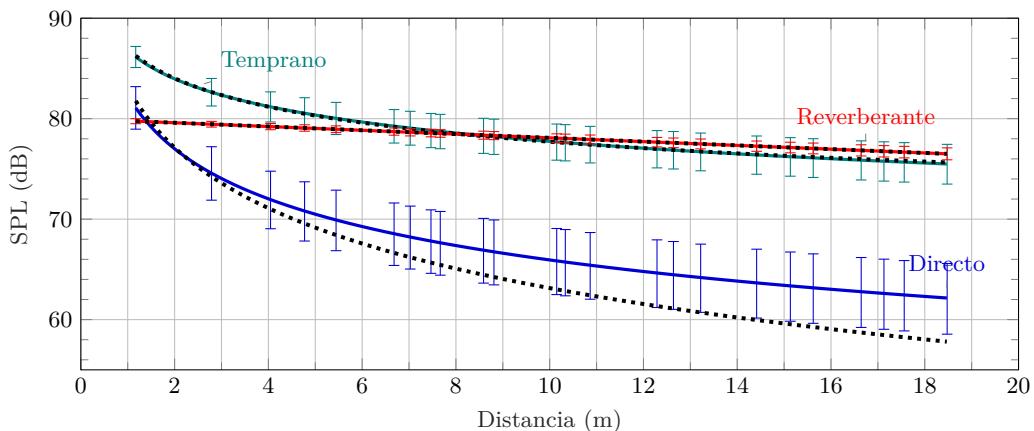


Figura 4.39: Ejemplo de ajuste de los tres campos acústicos por separado para el aula OP/S003 simulada en EASE y ajustada mediante regresión (líneas discontinuas).

4.5. Inteligibilidad

Una vez se obtienen las ecuaciones ajustadas para determinar los campos acústicos a cualquier distancia, es posible utilizarlas para calcular parámetros que habitualmente se obtienen mediante medidas o simulaciones pesadas.

Teniendo en cuenta las definiciones de claridad (apartado 2.3.1), definición (apartado 2.3.2) y sonoridad (apartado 2.3.3) es posible obtener estos parámetros a través de las curvas de los campos tal que:

$$C_{50} = L_{p,\text{útil}} - L_{p,\text{perjudicial}} \quad (4.1)$$

$$D_{50} = \frac{10^{L_{p,\text{útil}}/10}}{10^{L_{p,\text{útil}}/10} + 10^{L_{p,\text{perjudicial}}/10}} \quad (4.2)$$

$$G = 10 \log_{10} \left(\frac{10^{L_{p,\text{útil}}/10} + 10^{L_{p,\text{perjudicial}}/10}}{(Z/p_0^2) I_{D,10m}} \right) \quad (4.3)$$

Donde: Z/p_0^2 → Es el factor necesario para obtener valores de presión normalizados por medio de valores de intensidad.

$I_{D,10m}$ → Es la intensidad del campo directo corregido a 10 metros.

En este caso se obtiene para todo el espectro de frecuencias y no para las recomendadas para claridad y definición, pero se puede tomar en consideración y equiparar. Esta solución permite calcular de forma teórica los parámetros de claridad, definición y sonoridad a través de la teoría revisada corregida.

En el caso de parámetros que necesiten ser procesados en bandas de frecuencia, como el índice de articulación (apartado 2.3.4), no es posible calcularlo, para ello sería preciso encontrar una relación entre la respuesta en frecuencia de la fuente y la teoría revisada corregida para obtener niveles por bandas de frecuencia. Por el momento no se ha profundizado en esta cuestión aunque en futuros estudios se planteará.

5. Resultados

A continuación se van a mostrar los coeficientes obtenidos mediante las simulaciones con EASE y los modelos validados (apartado 4.3) para ajustar la teoría revisada corregida (sección 2.4.3).

Para los casos sin modificaciones, tal como se encuentran los recintos reales, las curvas obtenidas con EASE y mediante la teoría revisada corregida se muestran en las figuras siguientes, para el resto de los casos sólo se van a mostrar los coeficientes obtenidos en los apartados posteriores.

En los casos con fuente en la esquina, tal como se ha visto en el apartado 2.1.2, el factor de directividad se debería ver modificado por los planos de las paredes aumentándolo a un factor $Q = 4$, este hecho no se cumple en debido a que la fuente en esquina en ambos recintos se encuentra a más de 0.5 metros de las paredes en los recintos sin modificar y esta distancia se reduce o aumenta dependiendo del factor de escala. Teniendo en cuenta que el coeficiente C_D multiplica la ecuación de campo directo, al igual que lo hace el factor de directividad Q , si se mantiene en todos los cálculos $Q = 1$, el coeficiente C_D equivale al factor de directividad de la fuente.

5.1. Recintos sin modificar

Las curvas obtenidas mediante la simulación de los modelos validados, sin modificar sus dimensiones, se muestran en las figuras siguientes. Se incluye el error de las curvas simuladas y también las curvas teóricas corregidas.

En las figuras 5.1 y 5.2 se encuentran las curvas para el caso del aula OP/S003 y en las figuras 5.3 y 5.4 para el aula EP/0-26M:

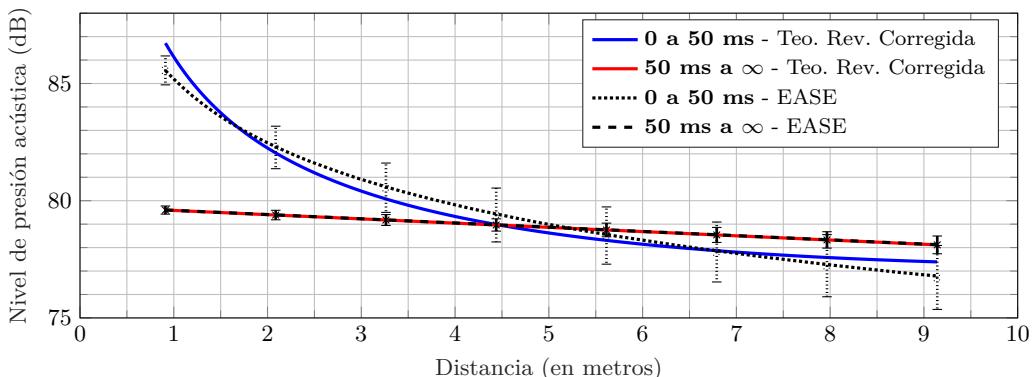


Figura 5.1: Representación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.195$, $C_L = 1.175$, $C_D = 0.937$, $\epsilon_E = -2.123$ y $C_E = 1.683$.

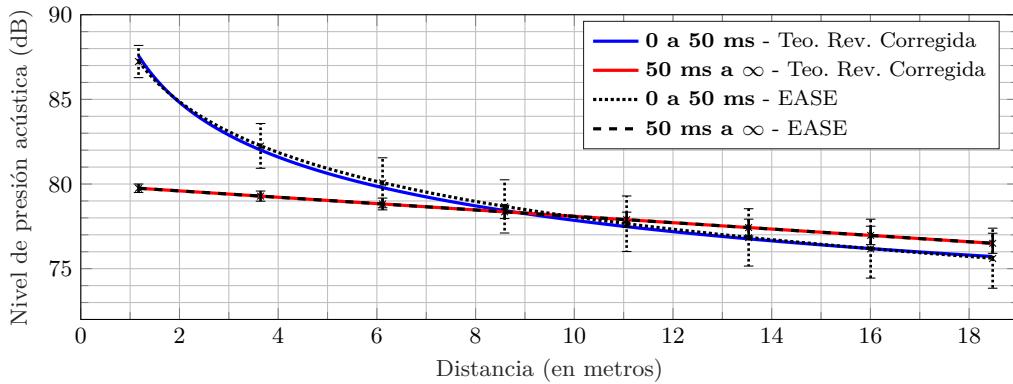


Figura 5.2: Representación del campo acústico en el aula OP/S003 con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.244$, $C_L = 1.268$, $C_D = 0.949$, $\epsilon_E = -0.339$ y $C_E = 3.533$.

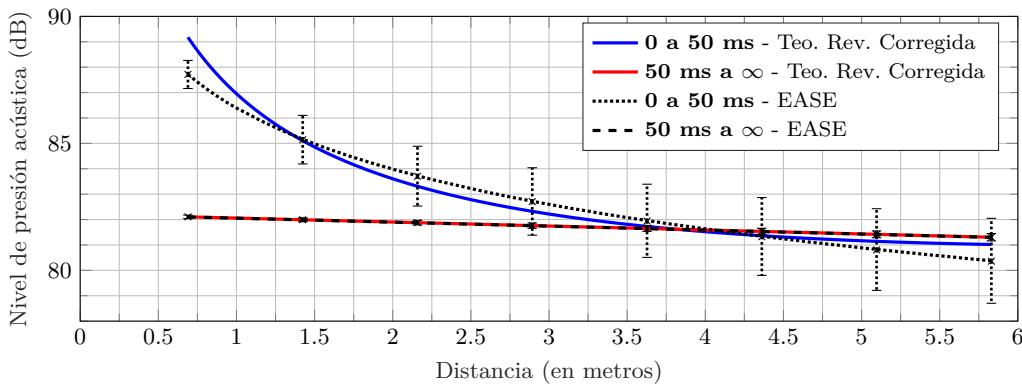


Figura 5.3: Representación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en el centro y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.081$, $C_L = 0.843$, $C_D = 0.965$, $\epsilon_E = -3.895$ y $C_E = 1.073$.

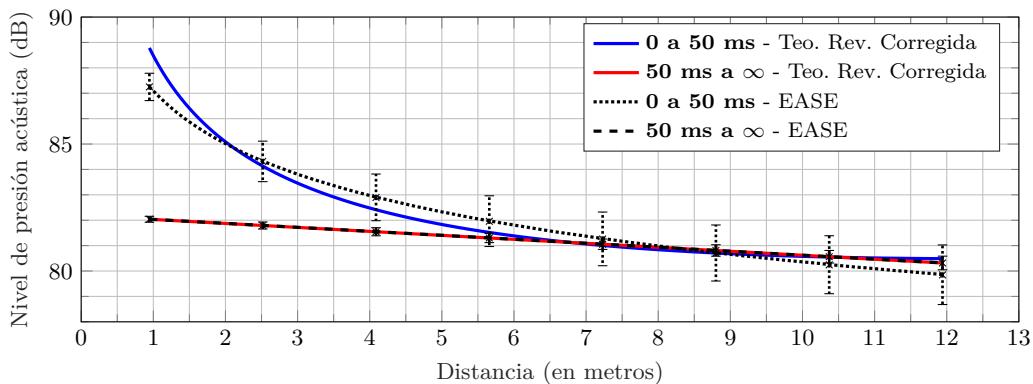


Figura 5.4: Representación del campo acústico en el aula EP/0-26M con fuente en la esquina y sin mobiliario simulado en EASE y las curvas de la teoría revisada corregida. Los coeficientes son: $\epsilon_L = 1.084$, $C_L = 0.839$, $C_D = 1.046$, $\epsilon_E = -2.209$ y $C_E = 1.618$.

5.1.1. Comparación de los valores obtenidos frente a los predichos

A continuación se muestran los niveles obtenidos en cada receptor frente a los predichos por la teoría revisada corregida tanto para el campo útil como para el perjudicial. Con estas representaciones es más sencillo observar las desviaciones de la teoría revisada corregida respecto a los valores simulados.

En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran las desviaciones para el caso del aula OP/S003. Como era de suponer, visto el ajuste de las curvas en el apartado anterior, la desviación entre la simulación y los valores teóricos es muy baja.

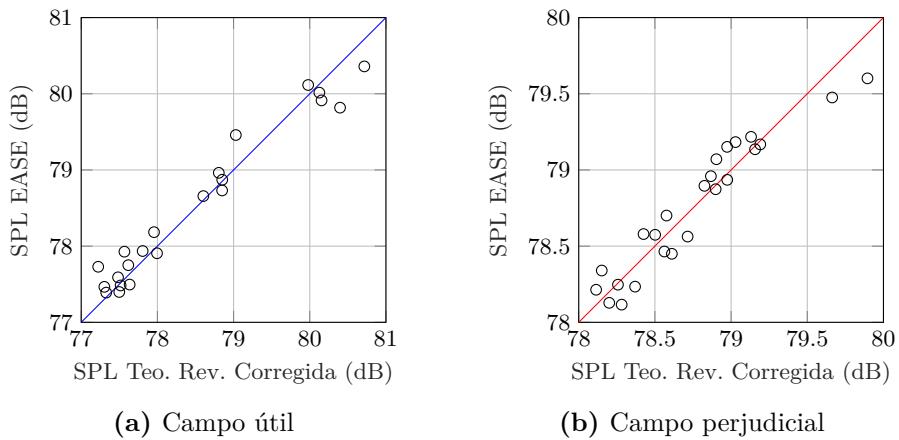


Figura 5.5: Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula OP/S003 con fuente en el centro.

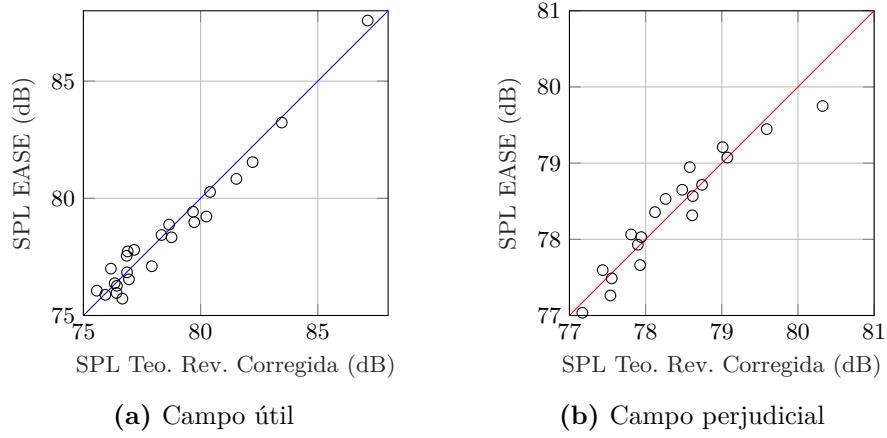


Figura 5.6: Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula OP/S003 con fuente en la esquina.

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran las desviaciones para el caso del aula EP/0-26M. En este caso se obtiene aún un mejor ajuste que en el aula OP/S003.

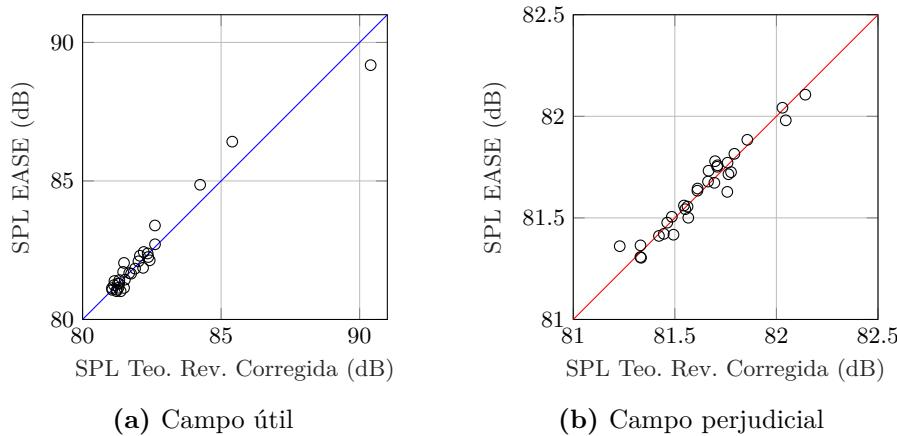


Figura 5.7: Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula EP/0-26M con fuente en el centro.

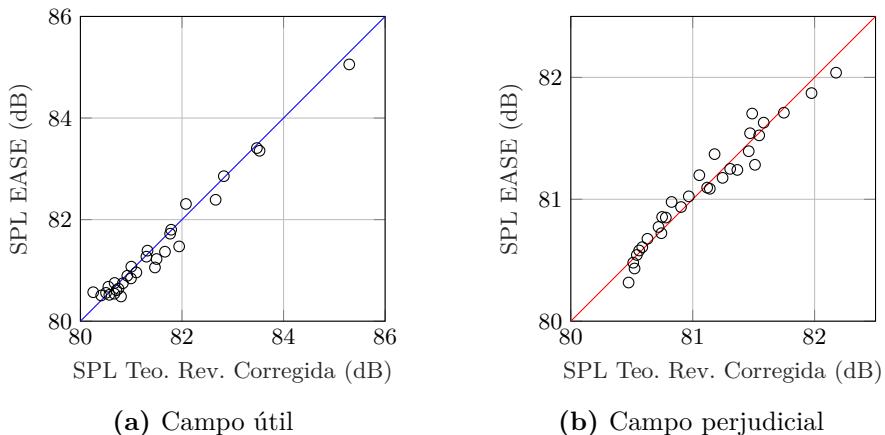


Figura 5.8: Valores de campo útil y perjudicial obtenidos con EASE y con la teoría revisada corregida enfrentados para el caso del aula EP/0-26M con fuente en la esquina.

5.1.2. Intelligibilidad

Los parámetros de inteligibilidad que se van a calcular son los mencionados en el capítulo de desarrollo (apartado 4.5).

Se han obtenido los valores de C_{50} , D_{50} y G tanto con las curvas simuladas en EASE como con las calculadas mediante la teoría revisada corregida. En las gráficas se incluye, además de la curva, los valores en cada receptor y así poder analizar en mayor medida el ajuste de la curva teórica.

5.1.2.1. OP/S003

Como se puede observar, las curvas de la teoría revisada corregida para los casos de C_{50} y D_{50} , sobretodo con fuente en el centro, se ajustan perfectamente a los valores obtenidos en los receptores.

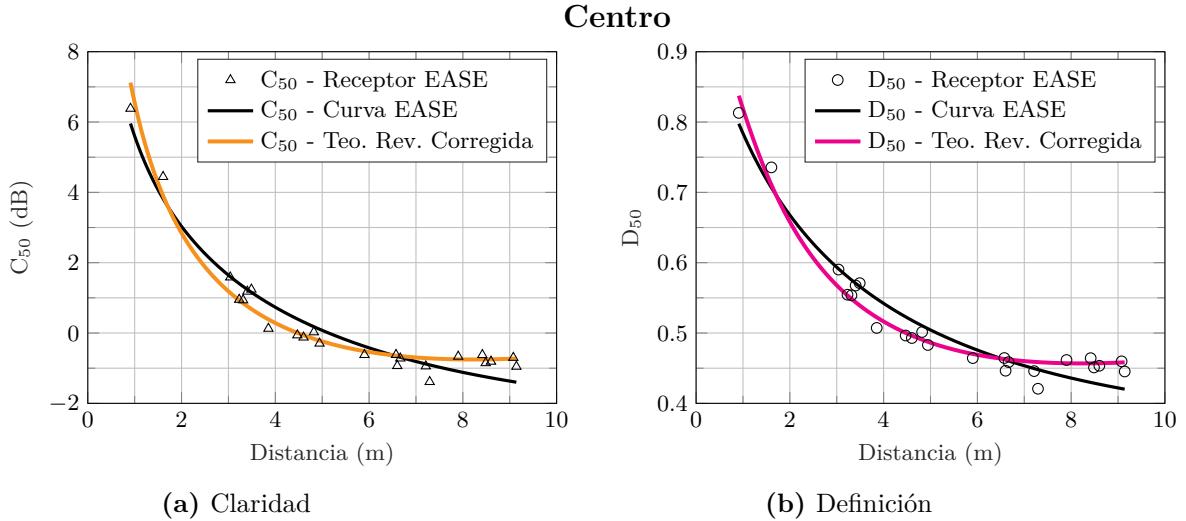


Figura 5.9: Claridad y definición obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario con fuente en el centro simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.

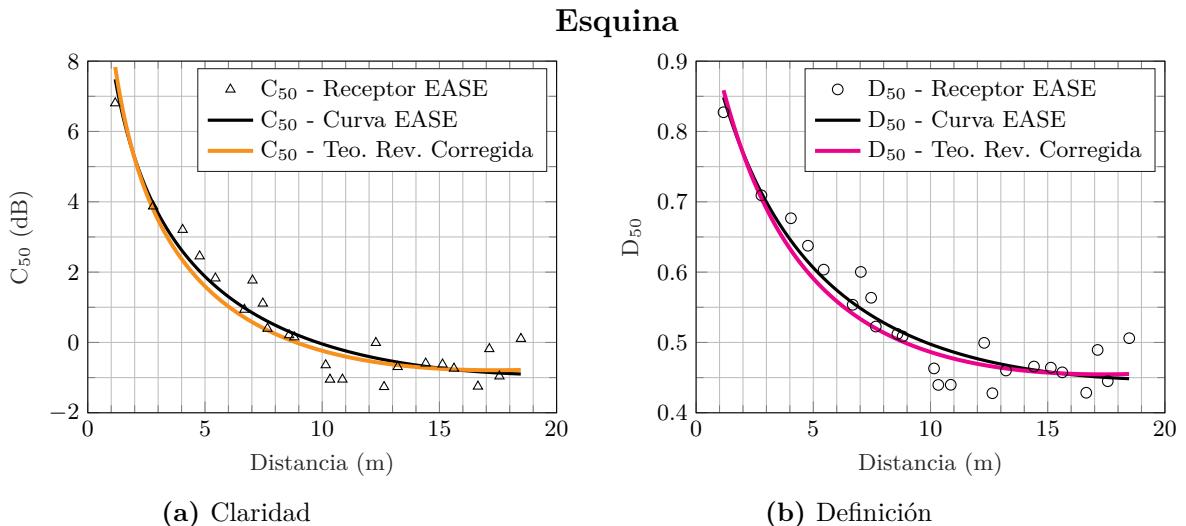
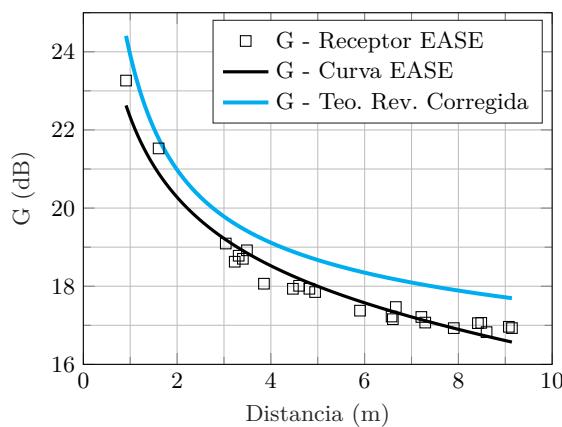
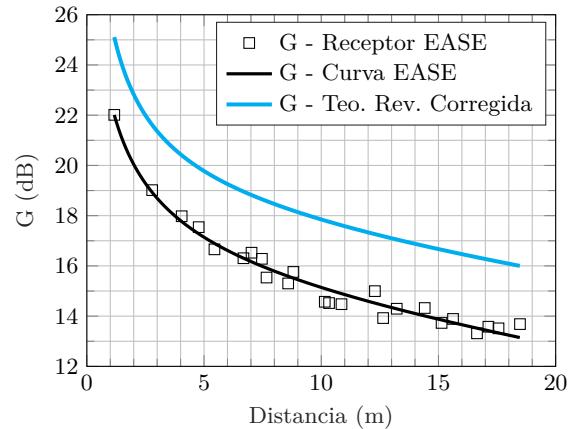


Figura 5.10: Claridad y definición obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario con fuente en la esquina simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.

Por último se muestran los resultados de la sonoridad que a diferencia de los anteriores no tienen un ajuste tan bueno.



(a) Fuente en el centro

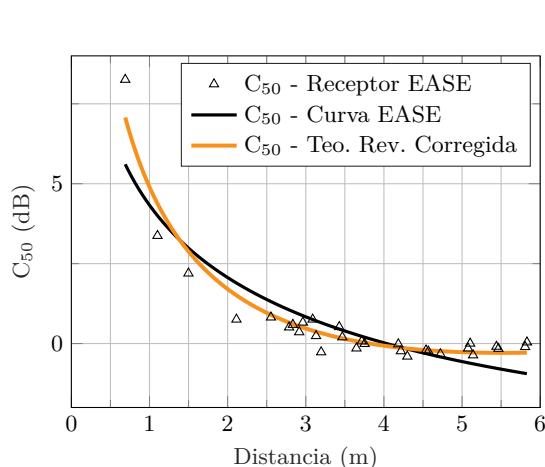


(b) Fuente en la esquina

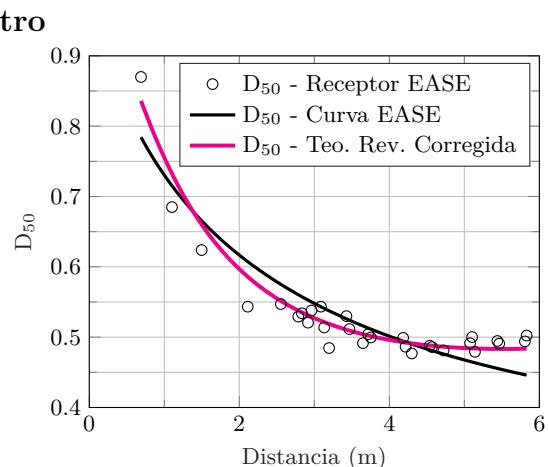
Figura 5.11: Sonoridades obtenidas en el aula OP/S003 sin mobiliario con ambas posiciones de fuente simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.

5.1.2.2. EP/0-26M

Al igual que en el aula OP/S003, las curvas de la teoría revisada corregida para los casos de C_{50} y D_{50} se ajustan muy bien a los valores obtenidos en los receptores.



(a) Claridad



(b) Definición

Figura 5.12: Claridad y definición obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario con fuente en el centro simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.

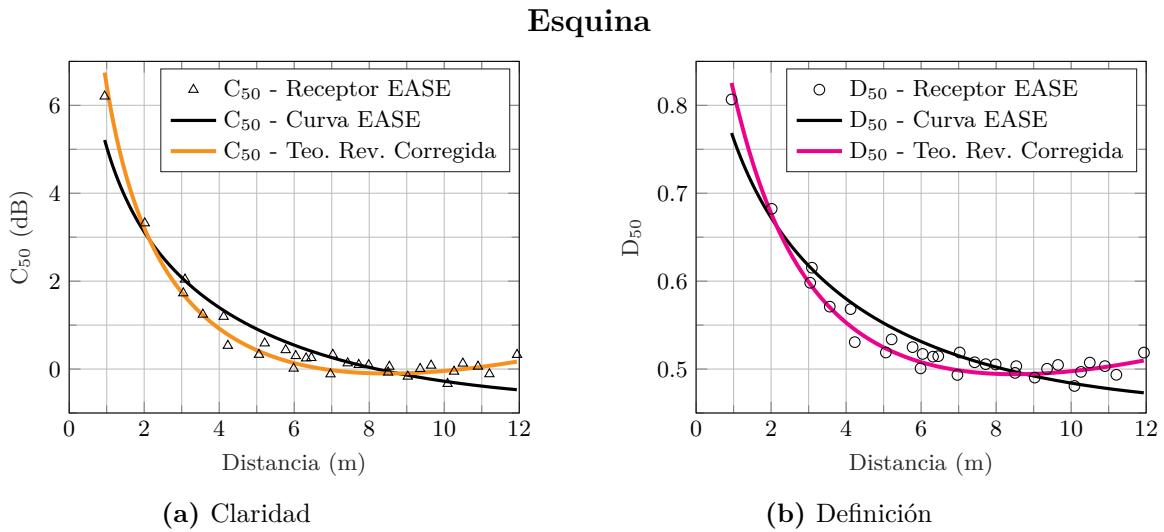


Figura 5.13: Claridad y definición obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario con fuente en la esquina simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.

Como en los resultados del aula OP/S003 la sonoridad no tiene un ajuste tan bueno como los parámetros anteriores.

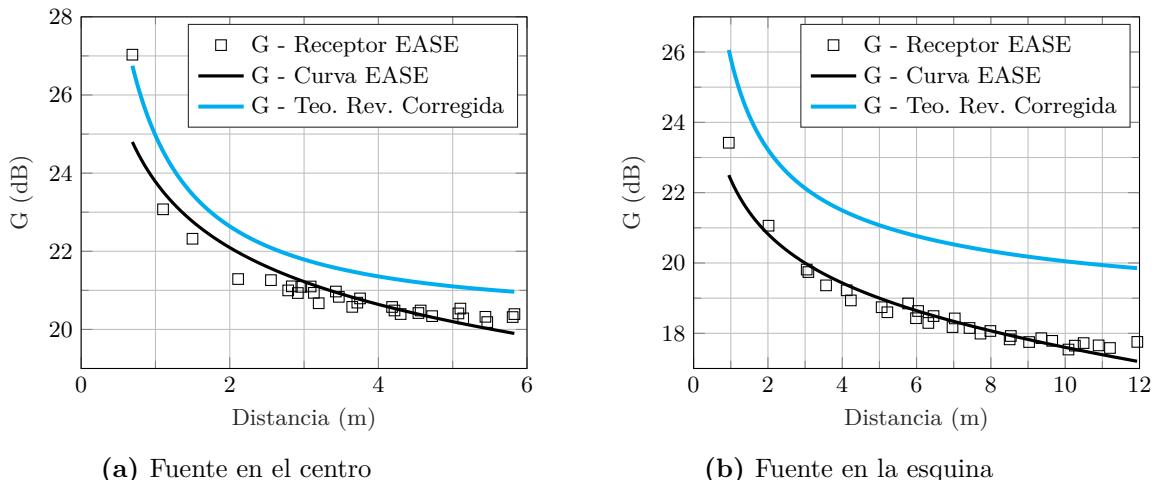


Figura 5.14: Sonoridades obtenidas en el aula EP/0-26M sin mobiliario con ambas posiciones de fuente simulada en EASE y mediante la teoría revisada corregida.

5.2. Recintos escalados

Se han obtenido los coeficientes para cada escalado de los recintos, un total de 16 tamaños para el aula OP/S003 (incluyendo el tamaño original) y otros 16 para el aula EP/0-26M (incluyendo los recintos sin modificar, factor de escala igual a 1).

A continuación se muestran los resultados de cada cálculo (dimensiones, coeficientes, etc) tanto para los casos con fuente en la esquina como en el centro, el resto de detalles se pueden consultar en el anexo B.

Los coeficientes en el aula OP/S003, como se puede observar en las figuras 5.15 y 5.16, mantienen una aparente linealidad a partir de los $500\ m^3$ siguiendo una tendencia incremental en ambos coeficientes del campo temprano tanto con fuente en el centro como en la esquina, y una tendencia incremental para el coeficiente ϵ_L y decremental para C_L . En el aula EP/0-26M (figuras 5.17 y 5.18) sucede lo mismo que en el aula OP/S003 excepto en el campo tardío con fuente en la esquina donde ambos coeficientes se reducen al aumentar el volumen.

En el apartado 5.2.3 se comparan los resultados de ambos recintos y se comenta el significado de estos incrementos y decrementos.

5.2.1. Aula OP/S003

5.2.1.1. Fuente en el centro

Factor de escala	Volumen m^3	Superficie m^2	T_{eyring} s	$\bar{\alpha}$	C_D	ϵ_E	C_E	ϵ_L	C_L
0.5	62	128	0.62	0.118	0.869	-3.553	0.909	0.980	1.262
0.6	107	184	0.75	.	0.791	-3.310	1.054	0.985	1.175
0.7	170	251	0.87	.	0.796	-3.341	1.118	1.004	1.121
0.8	253	328	0.99	.	0.839	-3.271	1.199	1.024	1.090
0.9	361	415	1.12	.	0.866	-2.998	1.325	1.058	1.087
1	495	512	1.24	.	0.937	-2.123	1.683	1.195	1.175
1.1	659	619	1.37	.	0.967	-1.250	2.083	1.256	1.175
1.2	855	737	1.49	.	1.025	-2.095	1.756	1.309	1.168
1.3	1087	865	1.62	.	1.028	-0.338	2.579	1.336	1.141
1.4	1358	1003	1.74	.	1.028	1.200	3.559	1.351	1.118
1.5	1670	1152	1.86	.	1.019	-1.176	2.334	1.373	1.101
1.6	2027	1310	1.99	.	1.018	1.154	3.693	1.381	1.077
1.7	2431	1479	2.11	.	1.012	-1.776	2.014	1.422	1.074
1.8	2885	1658	2.24	.	1.017	1.746	4.321	1.423	1.051
1.9	3394	1848	2.36	.	1.017	-0.425	2.944	1.477	1.059
2	3958	2048	2.49	.	1.017	0.087	3.182	1.486	1.045

Tabla 5.1: Coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en el centro. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2.

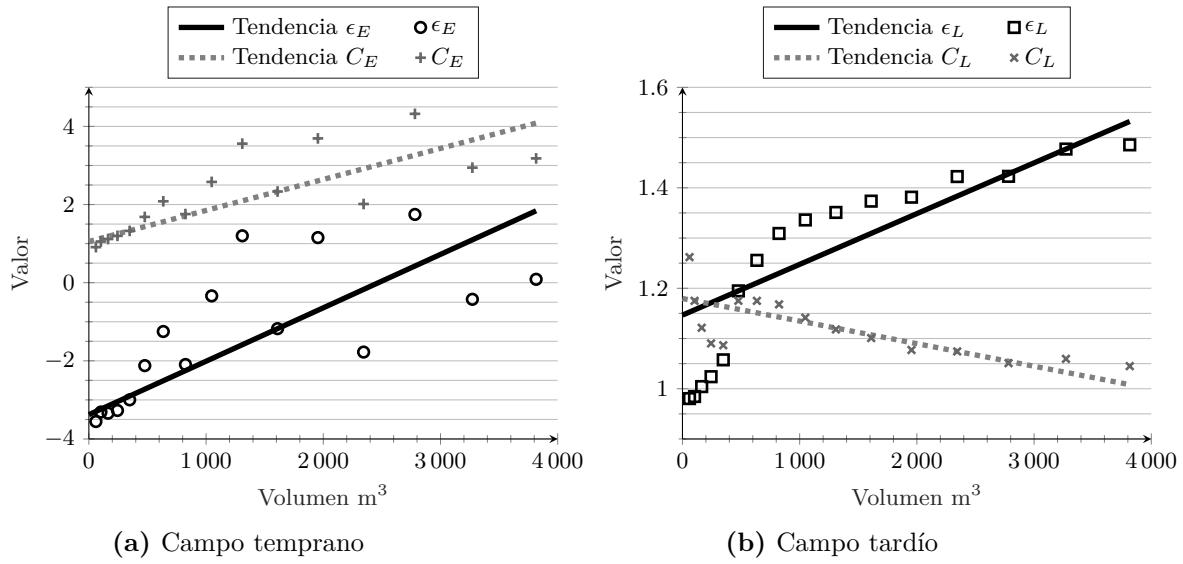


Figura 5.15: Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulada en EASE con fuente en el centro frente al volumen.

5.2.1.2. Fuente en la esquina

Factor de escala	Volumen m^3	Superficie m^2	T_{eyring} s	$\bar{\alpha}$	C_D	ϵ_E	C_E	ϵ_L	C_L
0.5	62	128	0.62	0.118	1.696	-0.982	1.993	0.936	1.241
0.6	107	184	0.75	.	1.413	-0.837	2.325	0.997	1.251
0.7	170	251	0.87	.	1.174	-0.617	2.739	1.058	1.233
0.8	253	328	0.99	.	1.029	-0.511	3.024	1.118	1.237
0.9	361	415	1.12	.	0.984	-0.425	3.286	1.202	1.277
1	495	512	1.24	.	0.949	-0.339	3.533	1.244	1.268
1.1	659	619	1.37	.	0.910	-0.246	3.788	1.271	1.241
1.2	855	737	1.49	.	0.807	-0.103	4.120	1.276	1.198
1.3	1087	865	1.62	.	0.809	-0.022	4.369	1.275	1.152
1.4	1358	1003	1.74	.	0.815	0.139	4.768	1.273	1.117
1.5	1670	1152	1.86	.	0.883	0.084	4.790	1.274	1.084
1.6	2027	1310	1.99	.	0.927	0.140	5.006	1.297	1.074
1.7	2431	1479	2.11	.	0.943	0.209	5.232	1.313	1.061
1.8	2885	1658	2.24	.	0.981	0.427	5.798	1.323	1.047
1.9	3394	1848	2.36	.	0.954	0.394	5.787	1.325	1.028
2	3958	2048	2.49	.	0.970	0.539	6.218	1.335	1.019

Tabla 5.2: Coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en la esquina. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2.

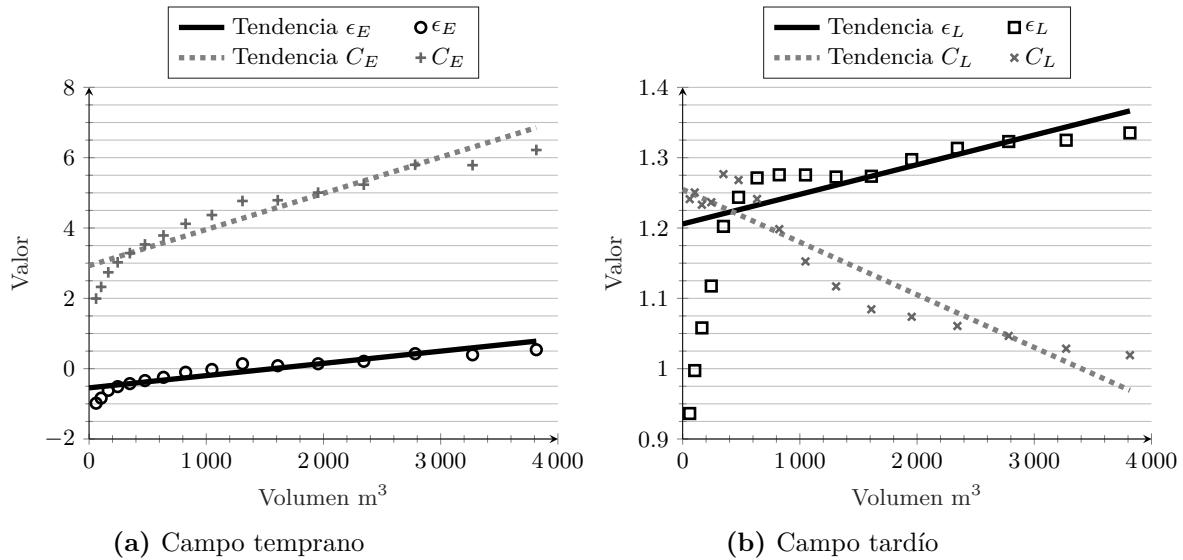


Figura 5.16: Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula OP/S003 sin mobiliario simulada en EASE con fuente en la esquina frente al volumen.

5.2.2. Aula EPS/0-26M

5.2.2.1. Fuente en el centro

Factor de escala	Volumen m ³	Superficie m ²	T _{eyring} s	$\bar{\alpha}$	C_D	ϵ_E	C_E	ϵ_L	C_L
0.5	29	68	0.59	0.109	.821	-5.706	0.589	1.164	1.238
0.6	49	98	0.70	.	.869	-5.755	0.664	0.964	0.945
0.7	78	133	0.82	.	.950	-5.917	0.708	0.888	0.850
0.8	117	174	0.94	.	.966	-5.047	0.863	0.976	0.920
0.9	166	220	1.05	.	.966	-3.872	1.077	0.986	0.922
1.0	228	272	1.27	.	.965	-3.895	1.073	1.081	0.843
1.1	304	329	1.29	.	.964	-4.869	1.036	0.962	0.882
1.2	394	391	1.40	.	.963	-3.646	1.257	0.921	0.852
1.3	501	459	1.52	.	.962	-3.505	1.298	1.004	0.896
1.4	626	532	1.64	.	.961	-2.162	1.665	1.081	0.929
1.5	770	611	1.76	.	.961	-0.123	2.277	1.047	0.903
1.6	934	695	1.87	.	.960	-2.655	1.630	1.077	0.908
1.7	1121	785	1.99	.	.959	-0.943	2.116	1.119	0.917
1.8	1330	880	2.11	.	.961	-1.478	3.101	1.137	0.914
1.9	1565	980	2.22	.	.958	-0.890	2.782	1.160	0.913
2.0	1825	1086	2.34	.	.957	-0.239	2.493	1.179	0.911

Tabla 5.3: Coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en el centro. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2.

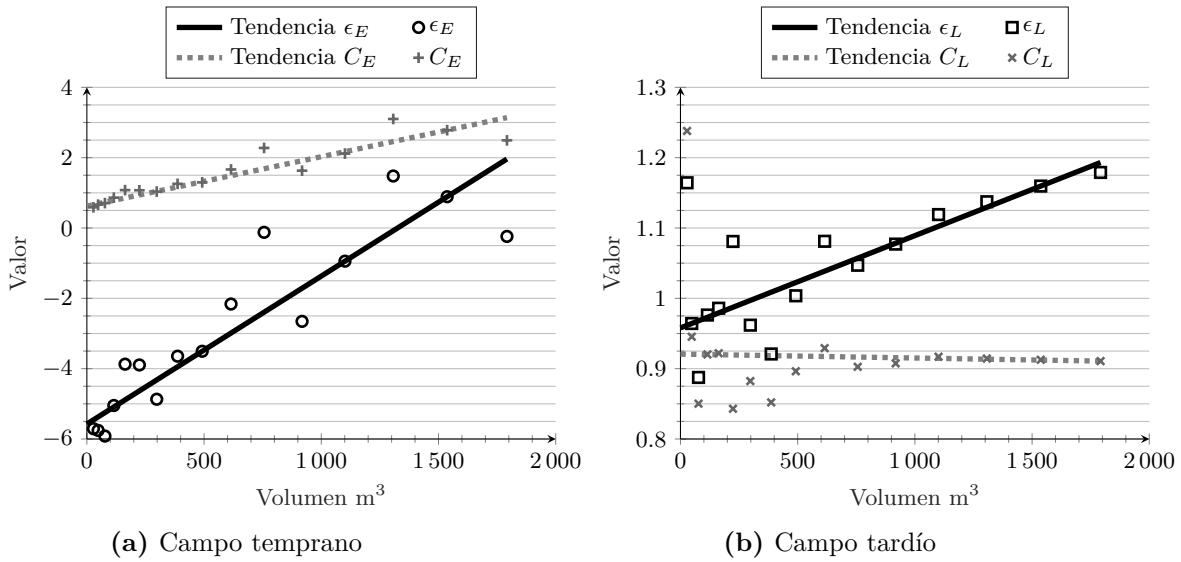


Figura 5.17: Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulada en EASE con fuente en el centro frente al volumen.

5.2.2.2. Fuente en la esquina

Factor de escala	Volumen m^3	Superficie m^2	T_{eyring} s	$\bar{\alpha}$	C_D	ϵ_E	C_E	ϵ_L	C_L
0.5	29	68	0.59	0.109	1.355	-2.543	1.052	0.960	0.933
0.6	49	98	0.70	.	1.280	-2.392	1.232	0.854	0.821
0.7	78	133	0.82	.	1.201	-2.310	1.370	0.901	0.865
0.8	117	174	0.94	.	1.003	-2.156	1.534	0.972	0.923
0.9	166	220	1.05	.	1.024	-2.081	1.654	0.987	0.923
1.0	228	272	1.27	.	1.046	-2.209	1.618	1.084	0.839
1.1	304	329	1.29	.	0.941	-1.709	2.008	0.990	0.890
1.2	394	391	1.40	.	0.937	-1.848	1.992	0.992	0.878
1.3	501	459	1.52	.	0.924	-1.541	2.229	0.993	0.871
1.4	626	532	1.64	.	0.905	-1.665	2.208	0.982	0.956
1.5	770	611	1.76	.	0.871	-1.597	2.304	0.966	0.839
1.6	934	695	1.87	.	0.895	-1.497	2.417	0.949	0.819
1.7	1121	785	1.99	.	0.923	-0.861	2.952	0.924	0.802
1.8	1330	880	2.11	.	0.922	-1.229	2.655	0.911	0.789
1.9	1565	980	2.22	.	0.954	-1.220	2.758	0.891	0.774
2.0	1825	1086	2.34	.	0.970	-1.017	2.965	0.866	0.757

Tabla 5.4: Coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M simulada en EASE, sin mobiliario y fuente en la esquina. Recinto escalado desde un factor de escala de 0.5 a 2.

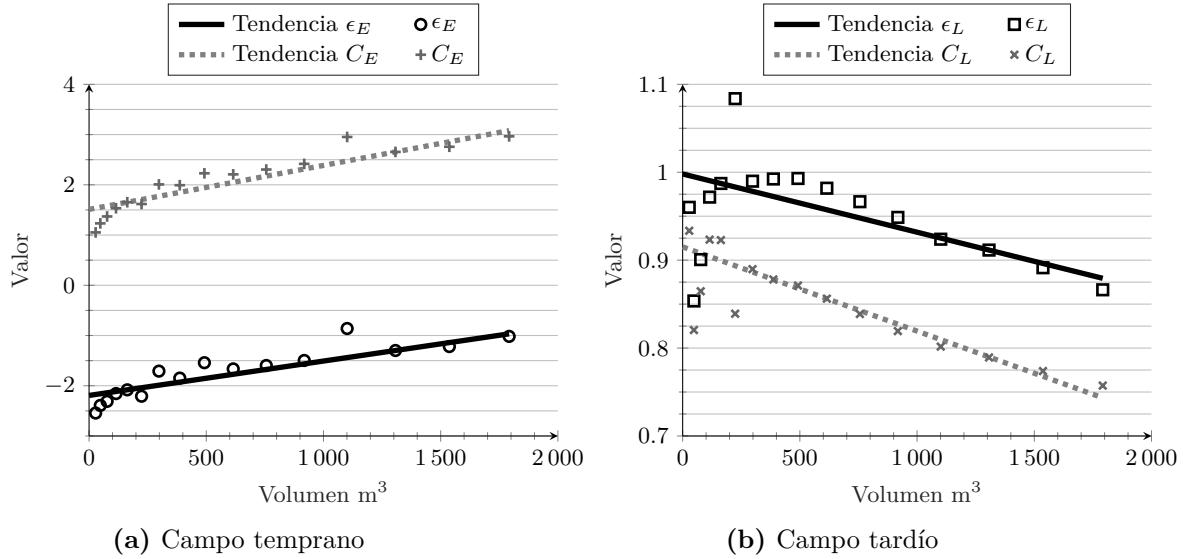


Figura 5.18: Valores y tendencias de los coeficientes obtenidos en el aula EP/0-26M sin mobiliario simulada en EASE con fuente en la esquina frente al volumen.

5.2.3. Comparación de coeficientes

A continuación se comparan las curvas de los coeficientes obtenidos en cada recinto, enfrentando los valores de fuente en esquina y de fuente en el centro de ambos recintos. Las tendencias se han prolongado para que ambas tengan valores hasta los 4000 m³.

En las figuras 5.21 y 5.24 se observa claramente la relación de la progresión de los coeficientes al aumentar el volumen. Para entender mejor la progresión de los coeficientes, en concreto los ϵ_x , se muestran a continuación curvas de campo temprano y perjudicial con diferentes valores de ϵ_x . Las variaciones de los coeficientes C_x se muestran en la figura 5.20.

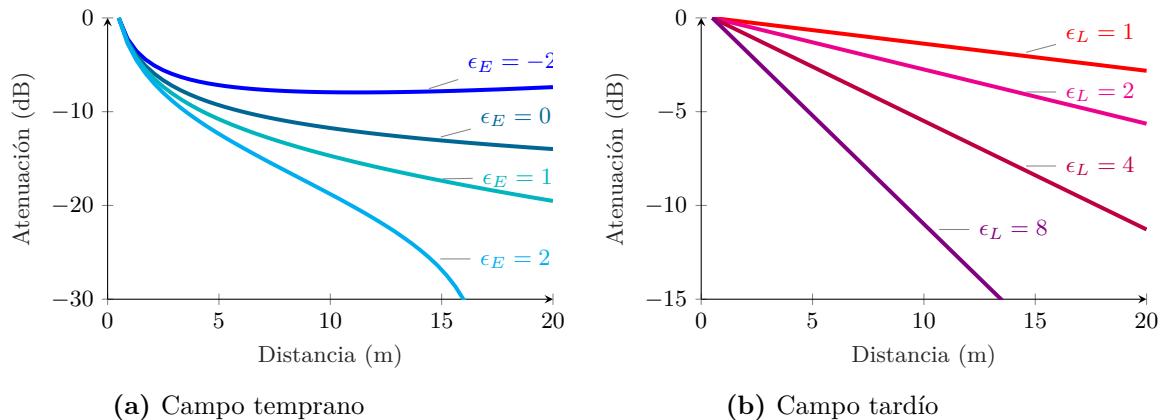


Figura 5.19: Diferencias de las curvas de campo temprano y perjudicial al modificar los coeficientes ϵ_x .

Y, para comprender visualmente la variación de coeficientes C_E y C_L , se ha realizado la

figura 5.20 donde se puede observar que al aumentar el coeficiente C_E el campo temprano aumenta su nivel global mientras que el perjudicial se mantiene con el mismo nivel. En cambio, cuando se aumenta C_L el campo temprano se reduce proporcionalmente al aumento que se produce en el campo perjudicial provocando el predominio del campo perjudicial en todo el campo acústico y no únicamente sobre el temprano.

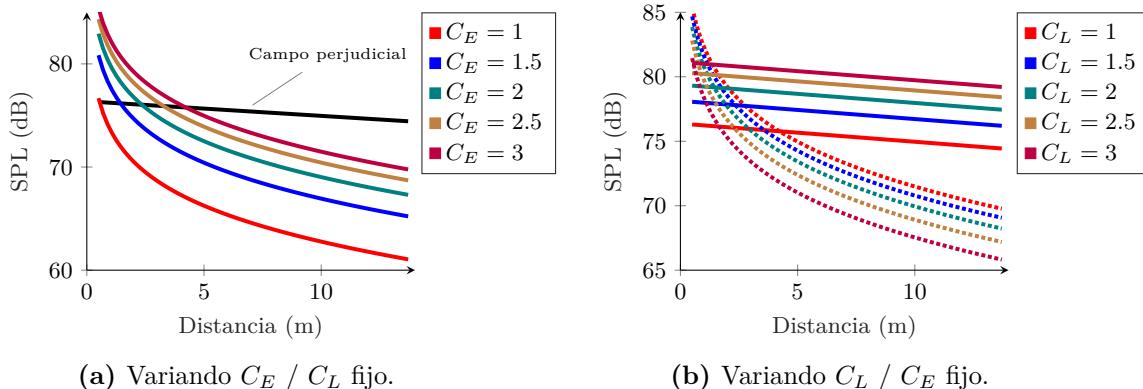


Figura 5.20: Diferencias de las curvas de campo temprano y perjudicial al modificar los coeficientes C_x .

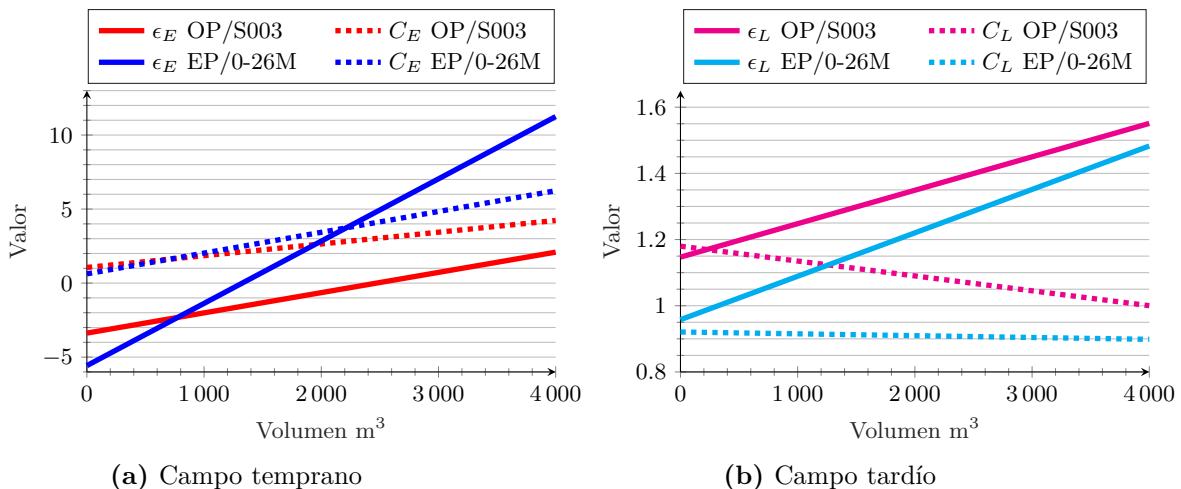
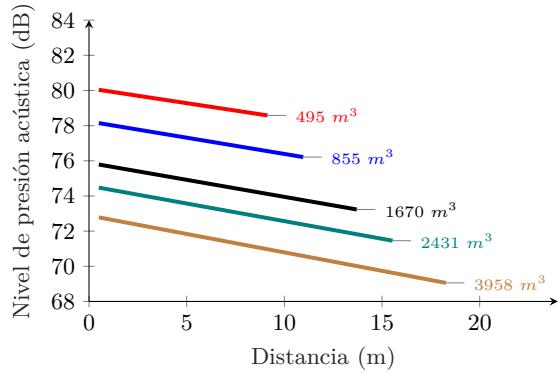
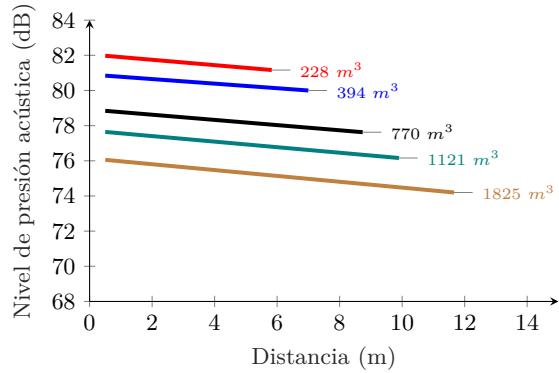


Figura 5.21: Curvas de coeficientes obtenidos en las aulas OP/S003 y EP/0-26M sin mobiliario con fuente en el centro.

En la figura 5.21 (fuente en el centro) el coeficiente C_L que modifica el nivel global del campo perjudicial, se reduce cuando aumenta el volumen del recinto pero el ϵ_L aumenta, esto nos dice que al aumentar el volumen del recinto el nivel de presión acústica del campo perjudicial se reduce y que su decaimiento frente a la distancia es mayor, es decir, las reflexiones que se suman tienen menor nivel debido al aumento de la distancia entre los planos del recinto (ver figura 5.22).



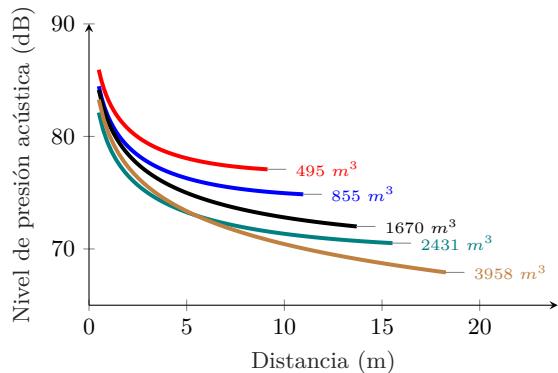
(a) OP/S003



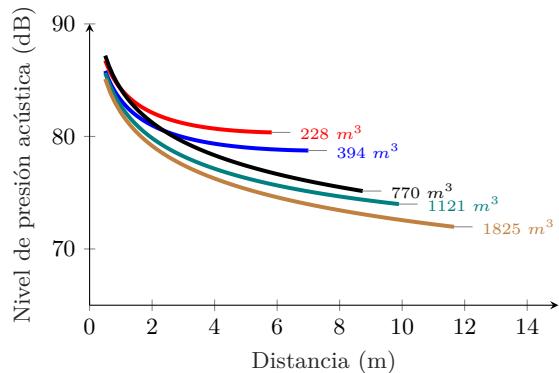
(b) EP/0-26M

Figura 5.22: Curvas de campo tardío de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en el centro.

En el campo temprano todos los coeficientes aumentan, esto nos indica un mayor decaimiento frente a la distancia debido al menor nivel de las reflexiones al recorrer más distancia (ver figura 5.23) como en el campo perjudicial pero por contra, el nivel global determinado por C_E es mayor indicando una menor relevancia del campo perjudicial en el campo acústico total, o lo que es lo mismo, el campo temprano predomina sobre el perjudicial en mayor cantidad cuanto más se aumente el volumen. Se debe recordar que la ecuación de campo temprano (apartado 2.4.3, ecuación 2.59) se calcula realizando una diferencia entre el campo acústico total (sin el campo directo) y el campo perjudicial.



(a) OP/S003



(b) EP/0-26M

Figura 5.23: Curvas de campo temprano de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en el centro.

Por lo tanto, al aumentar el volumen los campos temprano y tardío tienden a disminuir hasta su desaparición en el momento que el volumen sea tan grande que se pueda asumir campo libre, es decir, sin reflexiones.

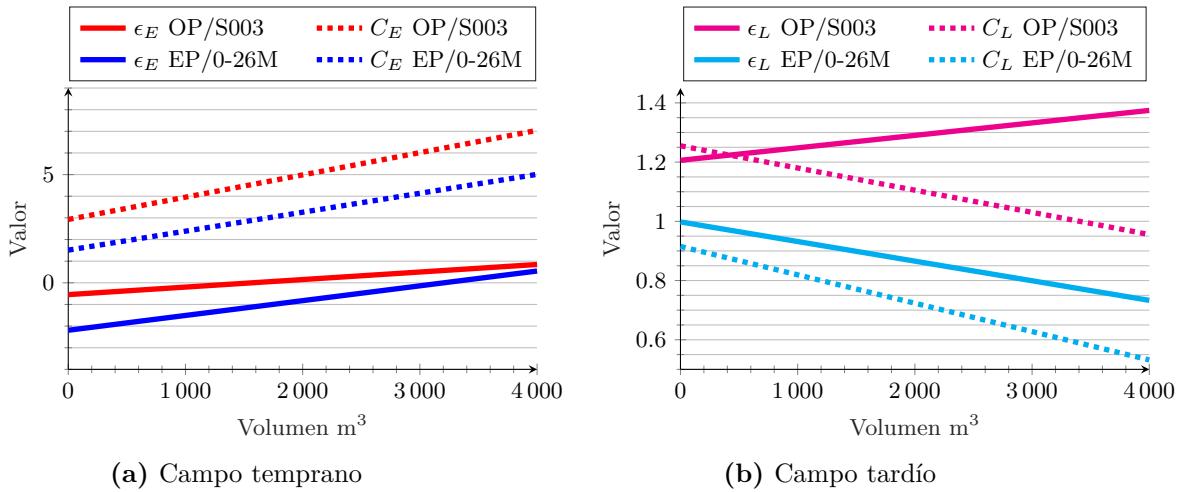


Figura 5.24: Curvas de coeficientes obtenidos en las aulas OP/S003 y EP/0-26M sin mobiliario con fuente en la esquina.

En la figura 5.24 (fuente en la esquina) para el campo temprano sucede lo mismo que lo comentado para la fuente en el centro, pero en el campo tardío el coeficiente ϵ_L del aula EP/0-26M se reduce indicando una pérdida menor del nivel de presión acústica de este campo respecto a la distancia asimilándose a un comportamiento estacionario (ver figura 5.25).

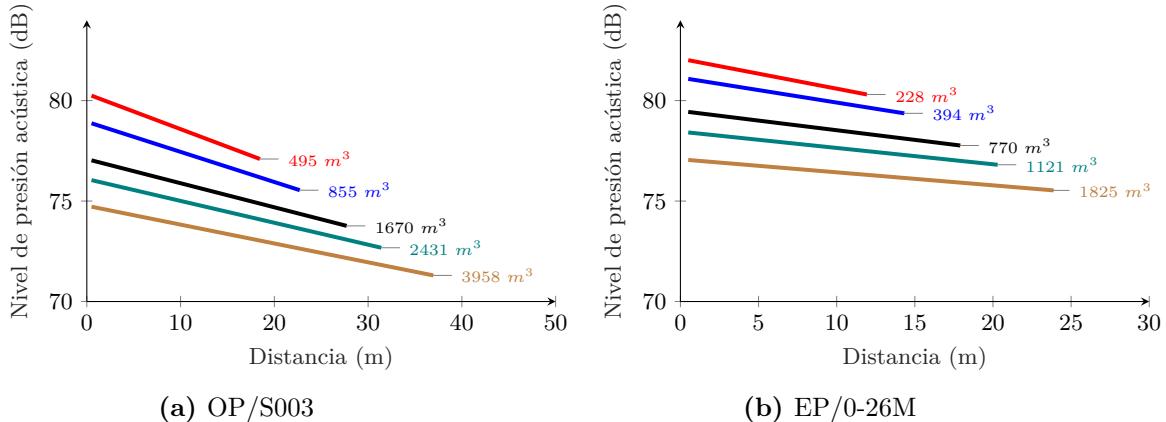


Figura 5.25: Curvas de campo tardío de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en la esquina.

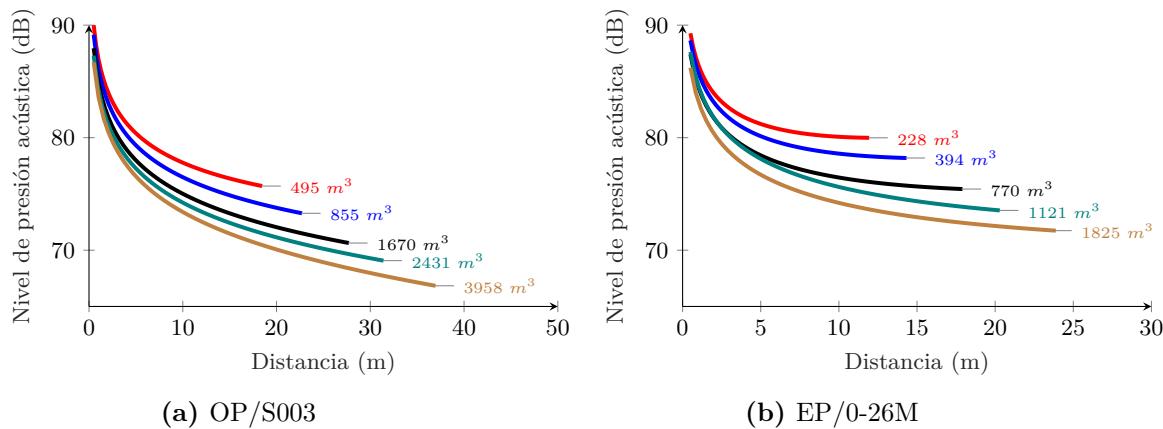


Figura 5.26: Curvas de campo temprano de la teoría revisada corregida en ambas aulas para diferentes factores de escala (1, 1.2, 1.5, 1.7 y 2.0) y con fuente en la esquina.

5.2.4. Relación de coeficientes con las características del recinto

Para cada factor de escala de recinto se han obtenido unos parámetros del recinto y unos coeficientes asociados, todos estos datos se pueden consultar en el anexo B.

El análisis de la relación entre los coeficientes y las características del recinto se ha realizado con el programa Eureqa (versión 1.24), este programa utiliza *machine learning* para probar millones de ecuaciones diferentes a partir de las variables de entrada y la variable de salida. Una vez finalizado el análisis se presentan una serie de posibles ecuaciones cada una de ellas con diferentes complejidades (número de operadores y variables) y diferentes errores.

La relación entre coeficientes y características se ha realizado sólo a partir del factor de escala 1.0 debido a las grandes diferencias en los escalados inferiores a la unidad, por lo que se ha obtenido una relación de 20 casos distintos para fuente en el centro (10 del aula OP/S003 y 10 del aula EP/0-26M) y 20 para fuente en la esquina. A continuación se muestra una ecuación para cada coeficiente elegida por tener buena relación entre complejidad y error máximo, en algunos casos no se ha obtenido una ecuación válida.

Campo tardío (ϵ_L):

- **Fuente en el centro:** $\epsilon_{L,centro} = 26.8 \cdot \bar{\alpha} + 0.062 \cdot \text{MFP} - 2.16$

Introduce un error máximo frente a los valores obtenidos con los factores de escala (de 1.0 a 2.0) del 10.19%.

- **Fuente en la esquina:** $\epsilon_{L,esquina} = 1.21 + 3.45 \cdot \bar{\alpha} \cdot \text{MFP} - 1.22T$

Introduce un error máximo frente a los valores obtenidos con los factores de escala (de 1.0 a 2.0) del 3.99%.

Campo tardío (C_L):

- **Fuente en el centro:** $C_{L,centro} = 41.7 \cdot \bar{\alpha} + 0.284 \cdot T - 3.92 - 10^{-4} \cdot (1.69 \cdot A + 3.18 \cdot S)$

Introduce un error máximo frente a los valores obtenidos con los factores de escala (de 1.0 a 2.0) del 4.93%.

- **Fuente en la esquina:** $C_{L,esquina} = 59.1 \cdot \bar{\alpha} + 0.242 \cdot \text{MFP} + 0.0212 \cdot A + 5.55 \cdot 10^{-4} \cdot V - 5.88 - 4.77 \cdot 10^{-3} \cdot S$

Introduce un error máximo frente a los valores obtenidos con los factores de escala (de 1.0 a 2.0) del 4.38%.

Campo temprano (ϵ_E):

- **Fuente en el centro:** Todas las opciones obtenidas a través de Eureqa introducen un error máximo mayor al 100%.
- **Fuente en la esquina:** Todas las opciones obtenidas a través de Eureqa introducen un error máximo mayor al 100%.

Campo temprano (C_E):

- **Fuente en el centro:** Todas las opciones obtenidas a través de Eureqa introducen un error máximo mayor al 100%.
- **Fuente en la esquina:** $C_{E,esquina} = 168 \cdot \bar{\alpha} + 163 \cdot 10^{-5} \cdot S - 16.9$

Introduce un error máximo frente a los valores obtenidos con los factores de escala (de 1.0 a 2.0) del 15.15%.

Para comprobar la validez de las ecuaciones que han podido ser obtenidas se ha realizado un escalado del aula EP/0-26M con un factor 2.6 y obtenido los coeficientes para después calcular con las ecuaciones anteriores los mismos coeficientes mediante las características del recinto, los resultados se muestran en la tabla 5.5 para la fuente en la esquina y en la tabla 5.6 para la fuente en el centro.

Coeficiente	Simulación	Ecuación Eureqa	% Error
ϵ_L	0.823	0.783	5.11
C_L	0.718	0.778	7.71
ϵ_E	-0.588	-	-
C_E	3.601	4.412	18.38

Tabla 5.5: Comparación de cálculos de coeficientes mediante ajuste de curvas y mediante ecuaciones obtenidas con el programa Eureqa para el aula EP/0-26M con factor de escala 2.6 y fuente en la esquina.

Coeficiente	Simulación	Ecuación Eureqa	% Error
ϵ_L	1.194	1.304	8.44
C_L	0.803	0.871	7.81
ϵ_E	-0.105	-	-
C_E	2.717	-	-

Tabla 5.6: Comparación de cálculos de coeficientes mediante ajuste de curvas y mediante ecuaciones obtenidas con el programa Eureqa para el aula EP/0-26M con factor de escala 2.6 y fuente en el centro.

Los coeficientes de los que no se ha obtenido ecuación se muestran con un guión y el error de las que sí se ha obtenido ecuación se muestra en porcentaje.

6. Conclusiones

En este trabajo se han aplicado diferentes conceptos que se van a desglosar para detallar las conclusiones que se pueden extraer de cada uno de ellos.

6.1. Validación de modelos

Es la norma encontrar en la literatura que los modelos acústicos de recintos cerrados se validan con las medidas experimentales y concretamente comparando los valores de tiempo de reverberación, si los valores no son similares se ajustan los parámetros de absorción del modelo para igualarlos y finalmente validar el modelo.

Este método funciona muy bien y en la mayoría de los casos produce un modelo válido pero no tiene en cuenta la distribución de los parámetros de absorción que puede dar como resultado una mayor contribución de un campo acústico (directo, temprano o tardío) sobre otro en zonas donde experimentalmente no se produce, es por ello que aprovechando el análisis de los campos acústicos de este estudio se ha aplicado un paso más para la validación del modelo acústico de un recinto cerrado.

En concreto se propone seguir los siguientes pasos para realizar la validación de un modelo acústico de un recinto cerrado:

Medidas *in situ*:

Los pasos a seguir para obtener suficiente información del recinto real son:

1. Diseñar un mallado de puntos de recepción que proporcione un volumen de datos aceptable entre la posición de la fuente y la posición del receptor más alejado. Esto es necesario para obtener una curva de nivel frente a la distancia lo más ajustada posible a la realidad.
2. Realizar las mediciones en al menos 2 posiciones diferentes de emisor (esquina, centro, posición de orador, etc)
3. Una vez realizadas las medidas obtener el tiempo de reverberación (por bandas de octava) y realizar un análisis temporal en fracciones de 1 ms (ecograma, histograma o similar) con niveles sin ponderar, después guardar la información de cada receptor (reverberación, ecograma, posición y distancia a la fuente).

Simulación:

Esto es válido para cualquier software de simulación acústica de recintos.

1. Diseñar el modelo para ser lo más fiel posible en los planos límite del recinto y ubicando los puntos de recepción en las mismas posiciones que la medida *in situ*.

2. Si el recinto medido experimentalmente incluía múltiple mobiliario (se recomienda retirar todo lo prescindible para no generar excesivos planos en el modelo) es posible sustituirlo en el modelo por un plano o una caja que abarque la superficie del mobiliario con el mismo valor de absorción y un valor de difusión (*scattering*) equivalente al conjunto del mobiliario.
3. Realizar un primer cálculo asignando a los materiales los valores de absorción presentes en la literatura.
4. Comparar el tiempo de reverberación simulado con el medido experimentalmente (ambos en bandas de octava), si no son similares reajustar, con coherencia, los valores de absorción y volver a calcular. Repetir este paso hasta que los tiempos de reverberaciones sean similares.
5. Una vez igualados los tiempos de reverberación obtener una historia temporal de cada receptor a través del trazado de rayos o la respuesta al impulso, ya sea en fracciones de 1 ms o con tiempos de llegada de cada rayo.

Validación:

Una vez realizados los pasos anteriores, incluyendo una primera validación mediante los tiempos de reverberación, para validar finalmente el modelo se deben seguir los siguientes pasos:

1. Tanto en las mediciones *in situ* como en las simulaciones, separar en dos rangos temporales las historias temporales, por ejemplo como el que se utiliza en este estudio, integrar una parte de 0 a 50 ms e integrar el resto (de 50 ms a infinito).
2. Despues de realizar esta integración se tendrán dos niveles para cada receptor (campo útil y campo perjudicial), estos datos se deben representar frente a la distancia que cada receptor tiene respecto a la fuente.
3. Una vez representados todos los puntos se deben aproximar a una curva cada uno de los rangos temporales, en concreto para el rango temporal de 0 a 50 ms (campo útil) la curva debe ser una potencial con la forma $y = ax^b$ donde x es la distancia y para el rango temporal de 50 ms a infinito la curva debe ser polinómica de primer grado con la forma $y = mx + n$. Estas curvas ajustadas a los puntos tendrán un valor de ajuste y un margen de error que se debe tener en cuenta para el siguiente paso.
4. Una vez obtenidas las curvas tanto con las medidas experimentales como la simulación se deben comparar y analizar la diferencia entre ellas, incluyendo el margen de error de ambas. Este margen de error es necesario porque las curvas experimentales y las simuladas difícilmente pueden ser iguales y habrá que tener en cuenta los posibles valores (debido al margen de error) que pueden tomar las curvas para decidir si las curvas simuladas se ajustan a los valores de las curvas de las medidas experimentales.
5. Por último, si estas curvas no llegan a ser equivalentes se debe tener en cuenta el valor habitual en la literatura de un nivel de confianza del 95%, por el que si en los diferentes puntos de las curvas simuladas respecto a las experimentales la

diferencia (incluyendo los márgenes de error) no supera el 5% se siguen asumiendo equivalentes. Si quedan fuera del nivel de confianza hay que reajustar valores de absorción de los materiales para mantener los tiempos de reverberación pero distribuir de otro modo los campos acústicos.

6.2. Teoría revisada corregida

La teoría revisada corregida definida en el apartado 2.4.3 se ha desarrollado basándose en lo estudiado por Barron y Lee (1988) pero manteniendo en las ecuaciones la posibilidad de elegir cualquier tiempo de integración, permitiendo la aplicación de esta teoría en otros casos donde se estudien campos acústicos diferentes a los de este trabajo.

La corrección propuesta en este trabajo para la teoría revisada definida por Barron y Lee difiere en algunos aspectos a la corrección propuesta en Sato y Bradley (2008). Sato y Bradley proponen unas constantes para los términos exponenciales de las ecuaciones, y ninguna modificación de los niveles globales, mi propuesta incluye coeficientes variables para los términos exponenciales y para los niveles globales, incluído el campo directo.

Mediante herramientas como Matlab se han probado diferentes ubicaciones de los coeficientes de corrección para obtener el mejor ajuste posible a las medidas reales. Debido a este proceso se encontró que el campo temprano tenía un decaimiento frente a la distancia mayor a lo definido por los autores citados anteriormente (aunque en Sato y Bradley (2008) ya se adelantaba esta idea), analizando diferentes soluciones se ha determinado que el campo temprano decrece con la inversa de la distancia y así se ha indicado en el apartado 2.4.3 y aplicado a las ecuaciones que quedan del siguiente modo:

$$I_L(r) = \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \quad (6.1)$$

$$I_E(r) = \frac{4W}{Ar} \left(e^{-\left(\frac{13,82\frac{r}{c}}{T}\epsilon_E\right)} C_E - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \right) \quad (6.2)$$

$$I_D(r) = \frac{WQ}{4\pi r^2} C_D \quad (6.3)$$

$$I_{\text{útil}} = I_D + I_E \quad (6.4)$$

$$I_{\text{perjudicial}} = I_L \quad (6.5)$$

Donde: $I_D, I_E, I_L \rightarrow$ Son las intensidades de los campos directo (0-1ms), temprano (1ms-t) y tardío ($t-\infty$) respectivamente.

$\epsilon_L, C_L \rightarrow$ Son los coeficientes del campo perjudicial (Late).

$C_D \rightarrow$ Es el coeficiente del campo directo (Direct).

$\epsilon_E, C_E \rightarrow$ Son los coeficientes del campo de primeras reflexiones (Early).

El ajuste de estas ecuaciones a las curvas obtenidas en las medidas experimentales ofrecen un valor de R^2 en todos los casos mayor a 0.9 y en la mayoría de valor 1, por lo que su validez está confirmada quedando pendiente encontrar una relación entre los coeficientes y los parámetros del recinto. Una vez encontrada esta relación se obtendrán unos cálculos

teóricos de los campos acústicos muy fieles a lo que se obtendría en una medición *in situ*.

Para representar estos campos en niveles de presión acústica se debe añadir la impedancia acústica del aire y la presión de referencia:

$$L_{p,D}(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{Z}{p_0^2} \left(\frac{WQ}{4\pi r^2} C_D \right) \right] \quad (6.6)$$

$$L_{p,E}(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{Z}{p_0^2} \left(\frac{4W}{Ar} \left(e^{-\left(\frac{13,82\frac{r}{c}}{T}\epsilon_E\right)} C_E - e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \right) \right) \right] \quad (6.7)$$

$$L_{p,L}(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{Z}{p_0^2} \left(\frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13,82(\frac{r}{c}+t_0)}{T}\epsilon_L\right)} C_L \right) \right] \quad (6.8)$$

6.3. Relación de coeficientes con las características del recinto

Éste es el objetivo final del trabajo, obtener unas nuevas ecuaciones para el cálculo de los campos acústicos, sin coeficientes, tan solo parámetros del recinto y la fuente pero, como se ha podido ver en el apartado 5.2.4 no es sencillo encontrar una relación entre los parámetros del recinto y los coeficientes de corrección, se han tenido que utilizar programas de *machine learning* para intentar encontrar esas relaciones y aun así no se han encontrado unas relaciones coherentes.

Hay que tener en cuenta que se parte de un supuesto: *todos los modelos escalados seguirán siendo válidos como el modelo sin escalar*, y esto probablemente no es cierto provocando que la relación parámetros/coeficientes no tenga coherencia entre un factor de escala y otro.

La teoría revisada corregida planteada en este trabajo se ha demostrado que es consistente y se ajusta correctamente a las curvas de los campos acústicos, por ello es preciso ampliar los datos realizando medidas *in situ* en diferentes recintos con distintos parámetros y aplicar sobre esas medidas experimentales la teoría revisada corregida, para obtener los coeficientes eliminando la dependencia de la simulación acústica y así finalmente determinar si existe una relación entre los coeficientes y el recinto.

Bibliografía

- Arau-Puchades, H. (1996). Influencia del radio de reverberación en el establecimiento de la densidad de energía sonora estacionaria en campo difuso. *Revista de acústica*, 27, 19-21.
- Arau-Puchades, H. (1999). *Abc de la acústica arquitectónica*. Ceac.
- Arau-Puchades, H. (2012). Sound pressure levels in rooms: A study of steady state intensity, total sound level, reverberation distance, a new discussion of steady state intensity and other experimental formulae. *Building Acoustics*, 19(3), 205-220. doi: 10.1260/1351-010X.19.3.205
- Arau-Puchades, H., y Berardi, U. (2015). A revised sound energy theory based on a new formula for the reverberation radius in rooms with non-diffuse sound field. *Archives of Acoustics*, 40(1). doi: 10.1515/aoa-2015-0005
- Atal, B., Schroeder, M., y Sessler, G. (1966). *Subjective reverberation time and its relation to sound decay*. Bell Telephone Laboratories.
- Barron, M. (1971). The subjective effects of first reflections in concert halls—the need for lateral reflections. *Journal of Sound and Vibration*, 15(4), 475 - 494. doi: 10.1016/0022-460X(71)90406-8
- Barron, M. (1973). Growth and decay of sound intensity in rooms according to some formulae of geometric acoustics theory. *Journal of Sound and Vibration*, 27, 183-196. doi: 10.1016/0022-460X(73)90060-6
- Barron, M. (2009). *Auditorium acoustics and architectural design* (2a ed.). Spon Press. doi: 10.4324/9780203874226
- Barron, M. (2015). Theory and measurement of early, late and total sound levels in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(6), 3087-3098. doi: 10.1121/1.4919655
- Barron, M., y Lee, L. J. (1988). Energy relations in concert auditoriums. i. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), 618-628. doi: 10.1121/1.396840
- Bate, A. E., y Pillow, M. E. (1947). Mean free path of sound in an auditorium. *Proceedings of the Physical Society*, 59(4), 535.
- Beranek, L. L. (1993). *Acoustics* (4a ed.). American Institute of Physics.
- Beranek, L. L. (2006). Analysis of sabine and eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(3), 1399-1410. doi: 10.1121/1.2221392

- Beranek, L. L. (2011, ma). The sound strength parameter g and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(5), 3020–3026. doi: 10.1121/1.3573983
- Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica: sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*.
- Bistafa, S. R., y Bradley, J. S. (2000, feb). Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(2), 861–875. doi: 10.1121/1.428268
- Bolt, R. H., Doak, P. E., y Westervelt, P. J. (1950). Pulse statistics analysis of room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22(3), 328–340. doi: 10.1121/1.1906608
- Bonello, O. J. (1981). A new criterion for the distribution of normal room modes. *Journal of the Audio Engineering Society*, 29(9), 597–606.
- Borish, J., y Angell, J. B. (1983). An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise. *J. Audio Eng. Soc.*, 31(7/8), 478–488.
- Bradley, J. (2012). Optimising sound quality for classrooms. *Brazilian Acoustical Association*, 1–15.
- Bradley, J. S. (1986). Predictors of speech intelligibility in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 80(3), 837–845. doi: 10.1121/1.393907
- Bradley, J. S., Reich, R. D., y Norcross, S. G. (1999). On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4), 1820–1828. doi: 10.1121/1.427932
- Bradley, J. S., Sato, H., y Picard, M. (2003). On the importance of early reflections for speech in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(6), 3233. doi: 10.1121/1.1570439
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Chiles, S., y Barron, M. (2004). Sound level distribution and scatter in proportionate spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(3), 1585–1595. doi: 10.1121/1.1775279
- Choi, Y.-J. (2017). Comparison of two types of combined measures, sti and u50, for predicting speech intelligibility in classrooms. *Archives of Acoustics*, 42(3). doi: 10.1515/aoa-2017-0056
- Cohn, M., y Lempel, A. (1977, jan). On fast m-sequence transforms. *IEEE Transactions on Information Theory*, 23(1), 135–137. doi: 10.1109/tit.1977.1055666
- Cox, T., y D'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application* (2a ed.). Taylor & Francis.

- Davis, D. (1984). The modified hopkins-stryker equation. *Journal of Audio Engineering Society*, 32(11), 862–867.
- Davis, D., Patronis, E., y Brown, P. (2014). *Sound system engineering*. Taylor & Francis.
- Eyring, C. F. (1930). Reverberation time in dead rooms. *The Journal of Acoustical Society of America*, 1(2), 217-241.
- Fletcher, H., y Munson, W. A. (1933, oct). Loudness, its definition, measurement and calculation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 5(2), 82–108. doi: 10.1121/1.1915637
- French, N. R., y Steinberg, J. C. (1947). Factors governing the intelligibility of speech sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19(1), 90–119. doi: 10.1121/1.1916407
- Golomb, S. W. (1967). *Shift register sequences*. Holden-Day.
- Guarinos, J. V., Calleja, M. Y., Estepa, E. C., y Rico, J. C. E. (2015). Estimación del campo directo "vs" campo reverberante en un recinto de pública concurrencia de tamaño medio. *Tecniacustica*.
- Guarinos, J. V., Calleja, M. Y., y Rico, J. C. E. (2016). Estudio de la inteligibilidad de palabra de un recinto en función del balance del campo directo (útil) - reverberado (perjudicial). *EuroRegio*.
- Hass, H. (1951). Über den einfluss eines einfach-echos auf die hörsamkeit von sprache. *Acustica*, 1, 49-58.
- Hopkins, H. F., y Stryker, N. R. (1948). A proposed loudness-efficiency rating for loudspeakers and the determination of system power requirements for enclosures. *Proceedings of the IRE*, 36(3), 315-335. doi: 10.1109/JRPROC.1948.226221
- Hunt, F. V. (1964). Remarks on the mean free path problem. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 36(3), 556-564. doi: 10.1121/1.1919002
- Jäger, G. (1911). Zur theorie des nachhalls. *Wiener Akad, Ber., Math.-Naturwiss, Klasse, Bd, 120*, 613–634.
- Jetzt, J. J. (1979). Critical distance measurement of rooms from the sound energy spectral response. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(5), 1204-1211. doi: 10.1121/1.382786
- Jordan, V. L. (1970). Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(2A), 408–412. doi: 10.1121/1.1911535
- Jurkiewicz, Y., Wulfrank, T., y Kahle, E. (2012). Architectural shape and early acoustic efficiency in concert halls (1). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(3), 1253-1256. doi: 10.1121/1.4740493
- Knudsen, V. O. (1932). *Architectural acoustics* (1a ed.). J. Wiley & sons, Incorporated.

- Kosten, C. W. (1960). The mean free path in room acoustics. *Acustica*, 10(4), 245-250.
- Krokstad, A., Strøm, S., y Sørdsdal, S. (1968). Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1), 118 - 125. doi: 10.1016/0022-460X(68)90198-3
- Kryter, K. D. (1962a). Methods for the calculation and use of the articulation index. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(11), 1689–1697. doi: 10.1121/1.1909094
- Kryter, K. D. (1962b). Validation of the articulation index. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(11), 1698–1702. doi: 10.1121/1.1909096
- Kundt, A. (1866). Ueber eine neue art akustischer staubfiguren und über die anwendung derselben zur bestimmung der schallgeschwindigkeit in festen körpern und gasen. *Annalen der Physik*, 203(4), 497-523. doi: 10.1002/andp.18662030402
- Kundt, A. (1868). Iii. acoustic experiments. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 35(234), 41-48. doi: 10.1080/14786446808639937
- Kuttruff, H. (2016). *Room acoustics* (6a ed.). CRC Press.
- Lacatis, R., Giménez, A., Barba Sevillano, A., Cerdá, S., Romero, J., y Cibrián, R. (2008). Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3198-3198. doi: 10.1121/1.2933348
- Lehmann, P. (1976). *Über die ermittlung raumakustischer kriterien und deren zusammenhang mit subjektiven beurteilungen der hörsamkeit*. Technische Universität Berlin.
- Mankovsky, V. S. (1971). *Acoustics of studios and auditoria*. Communication Arts Books.
- Marshall, L. G. (1994, oc). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4), 2251–2261. doi: 10.1121/1.410097
- Millington, G. (1932). A modified formula for reverberation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 4(1A), 69-82. doi: 10.1121/1.1915588
- Morse, P., y Ingard, K. (1968). *Theoretical acoustics*. Princeton University Press.
- Nijs, L., y Rychtáriková, M. (2011). Calculating the optimum reverberation time and absorption coefficient for good speech intelligibility in classroom design using u50. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(1), 93–102. doi: 10.3813/aaa.918390
- Nijs, L., Versteeg, P., y van der Voorden, M. (2004). The combination of absorbing materials and room shapes to reduce noise levels. *International Congress on Acoustics*(We2.B1.2).
- Pelzer, S., Aspöck, L., Schröder, D., y Vorländer, M. (2014). Integrating real-time room acoustics simulation into a CAD modeling software to enhance the architectural design process. *Buildings*, 4(2), 113-138. doi: 10.3390/buildings4020113

- Plens, J. M. R., Guarinos, J. V., y Calleja, M. Y. (2017). Campo directo (útil) / reverberado (perjudicial). resultados experimentales frente a simulación en catt-acoustic. *Tecniacustica*.
- Reichardt, W., Alim, O., y Schmidt, W. (1974). Abhängigkeit der grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer durchsichtigkeit von der art des musikmotives, der nachhallzeit und der nachhalleinsatzzeit. *Applied Acoustics*, 7(4), 243–264. doi: 10.1016/0003-682x(74)90033-4
- Sabine, W. C. (1922). *Collected papers on acoustics*. Harvard University Press.
- Sarwate, D., y Pursley, M. (1980). Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences. *Proceedings of the IEEE*, 68(5), 593–619. doi: 10.1109/proc.1980.11697
- Sato, H., y Bradley, J. (2005). Acoustical conditions for speech communication in active elementary school classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(4), 2405–2405. doi: 10.1121/1.4786138
- Sato, H., y Bradley, J. S. (2008, ap). Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(4), 2064–2077. doi: 10.1121/1.2839283
- Schroeder, M. R. (1954). Die statistischen parameter der frequenzkurven von groen räumen. *Acustica*, 4(5), 594–600.
- Schroeder, M. R. (1962). Frequency-correlation functions of frequency responses in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1819–1823. doi: 10.1121/1.1909136
- Schuster, K., y Waetzmann, E. (1929). Über den nachhall in geschlossenen räumen. *Annalen der Physik*, 393(5), 671-695. doi: 10.1002/andp.19293930505
- Self, D., Duncan, B., Sinclair, I., Brice, R., Hood, J. L., Singmin, A., ... Watkinson, J. (2009). *Audio engineering: Know it all*. Elsevier Science.
- Stephenson, U. (2012). Different assumptions - different reverberation formulae. *Internoise*, 11.
- Sylvester, J. (1908). *The collected mathematical papers: (1870-1883)*. Cambridge University.
- Thiele, R. (1953). Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen. *Acustica*, 3(2), 2.
- Vorländer, M. (1995). Revised relation between the sound power and the average sound pressure level in rooms and consequences for acoustic measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, 81(4), 332-343.
- Wallach, H., Newman, E. B., y Rosenzweig, M. R. (1949). The precedence effect in sound localization. *The American Journal of Psychology*, 62, 315. doi: 10.2307/1418275
- Welti, T. (2009). Investigation of bonello criteria for use in small room acoustics. En *Audio engineering society convention 127*.

A. Programas desarrollados

A.1. CATT2Matlab

Para facilitar el procesado y la visualización de los datos producidos por el software CATT-Acoustic (versión 8) se ha realizado un programa con la herramienta Matlab. Se encuentra disponible en la plataforma GitHub y FileExchange.

Este programa permite importar tanto los resultados de parámetros acústicos como las historias temporales de cada receptor para después visualizarlos de forma sencilla y realizar algunos cálculos. Además, CATT-Acoustic almacena en sus archivos de salida información sobre las posiciones de los receptores, fuentes, parámetros del recinto, etc, que también se importan y se utilizan para mostrar o realizar los diferentes cálculos.

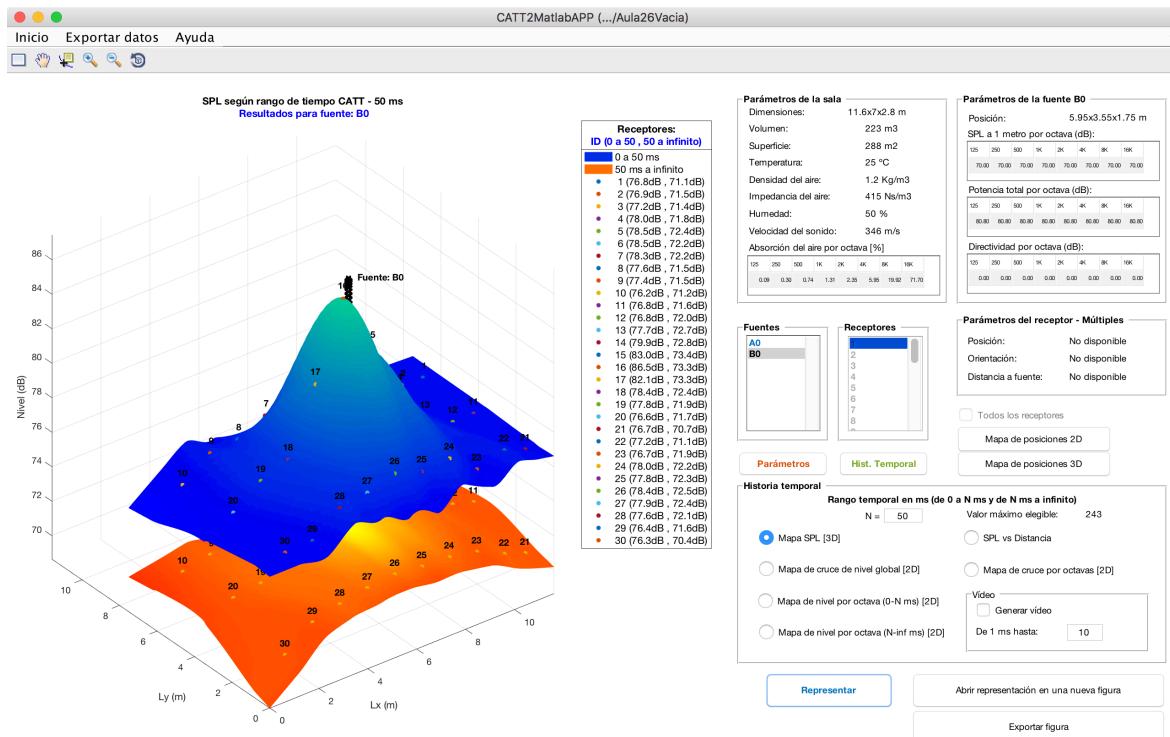


Figura A.1: Ventana completa del programa CATT2Matlab.

CATT2Matlab es compatible con Windows y Mac, y con versiones de Matlab 2014 o superior, es multilenguaje (español e inglés) y facilita la introducción de nuevos idiomas por parte del usuario.

Dispone de múltiples representaciones gráficas para todos los datos disponibles, éstas se

dividen en *parámetros acústicos* y *historia temporal* que se describirán brevemente a continuación, al final de esta sección se detallan otras funciones del programa.

A.1.1. Datos generales

Al importar los datos de CATT-Acoustic (carpeta *OUT* donde se almacenan los archivos de cálculo) se muestran los detalles del recinto, las fuentes y los receptores del siguiente modo:

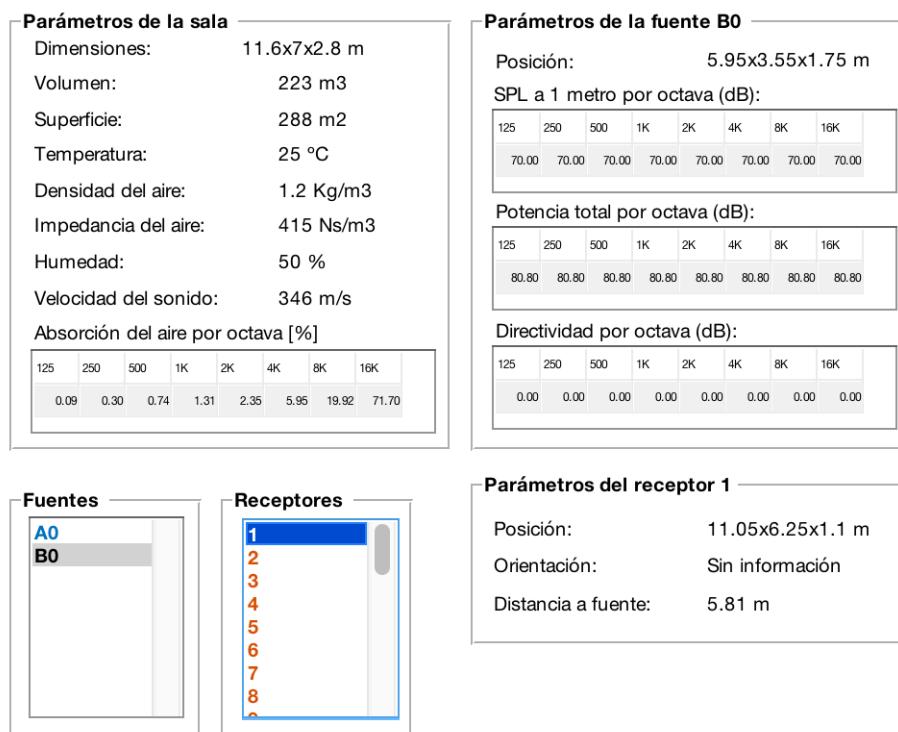


Figura A.2: Información general mostrada en CATT2Matlab.

Los parámetros de fuente o de receptor dependen de la selección de la lista de éstos, haciendo clic en otro de la lista se actualizan los detalles (posición, distancia, etc).

A.1.2. Parámetros acústicos

Son los parámetros que calcula CATT-Acoustic de forma estándar:

- Tiempo de reverberación: T30, T15, EDT.
- Tiempo central T_s .
- Claridad o definición: C50, C80, D50, D80.
- Eficiencia lateral: LF, LFC.
- Sonoridad G.
- Nivel total SPL.

- Mapa RaSTI.
- Mapa STI.

Se ofrecen todos ellos en un panel para seleccionar el que se desea representar. En el caso de que no se tengan calculados los valores de RaSTI o STI las opciones no serán visibles, y si CATT-Acoustic está configurado para calcular claridad los botones indicarán los parámetros C-xx sino aparecerá D-xx (definición).

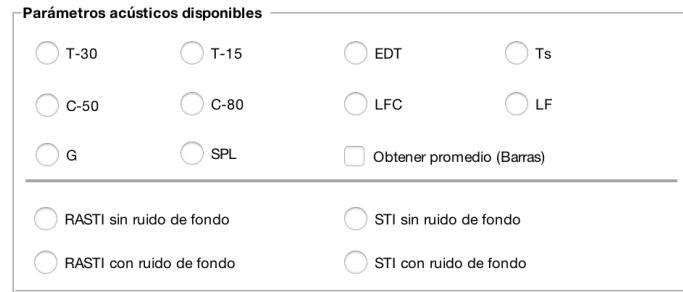


Figura A.3: Panel de parámetros acústicos de CATT2Matlab.

Permite seleccionar uno, varios o todos los receptores y representar los datos para cada receptor por separado o realizar un promedio.

A.1.3. Historia temporal

Para obtener la historia temporal de cada receptor es necesario habilitar esta función en CATT-Acoustic mediante el archivo *hiddenoptions.txt* (más información en el manual). Si en la carpeta existen los archivos de historia temporal el panel (figura A.4) será visible.

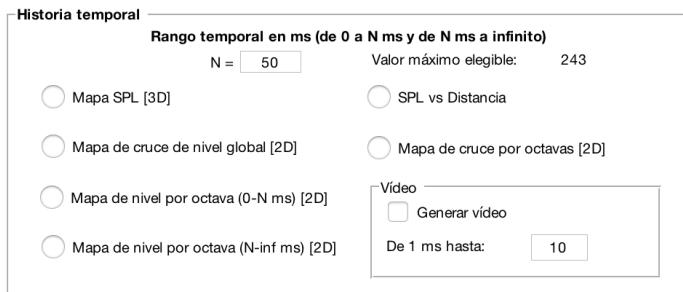


Figura A.4: Panel de historia temporal de CATT2Matlab.

Es posible elegir el tiempo de integración, por defecto el intervalo es de 0 a 50 ms y de 50 ms a infinito, pero el valor de 50 ms se puede modificar desde 2 al máximo tiempo de la historia temporal (*valor máximo elegible*).

En el panel se pueden seleccionar diferentes representaciones:

Mapa SPL: Muestra los campos acústicos espacialmente (plano XY), en tonos azules el

campo de 0 al intervalo elegido y en tonos rojos el campo desde el intervalo elegido a infinito.

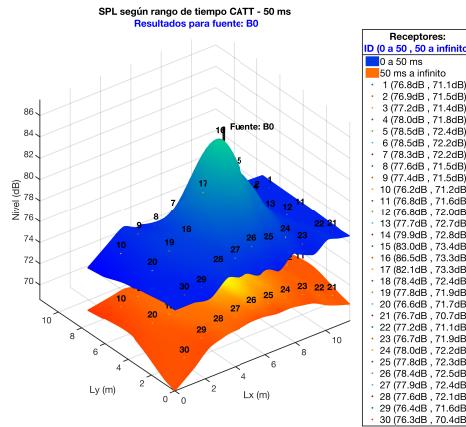


Figura A.5: Mapa SPL en 3D generado con CATT2Matlab.

SPL vs Distancia:

Muestra la progresión de los campos acústicos frente a la distancia, el mismo tipo de representación utilizada en este trabajo.

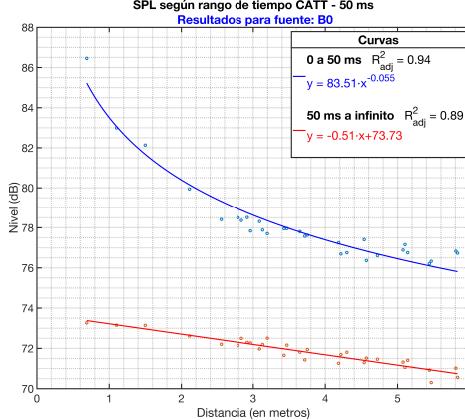


Figura A.6: Representación de niveles frente a la distancia generado con CATT2Matlab.

Mapa de cruce global o por octavas:

Muestra espacialmente las zonas donde predomina uno u otro campo acústico.

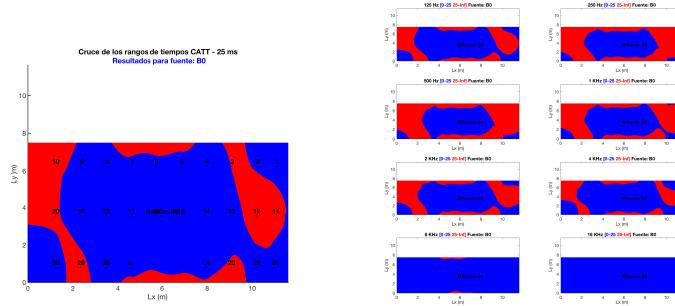


Figura A.7: Mapas de cruce de campos acústicos global y por octavas del programa CATT2Matlab.

Mapa de nivel por octava:

Muestra los niveles del campo acústico de 0 al intervalo elegido o del intervalo elegido a infinito para cada banda de octava.

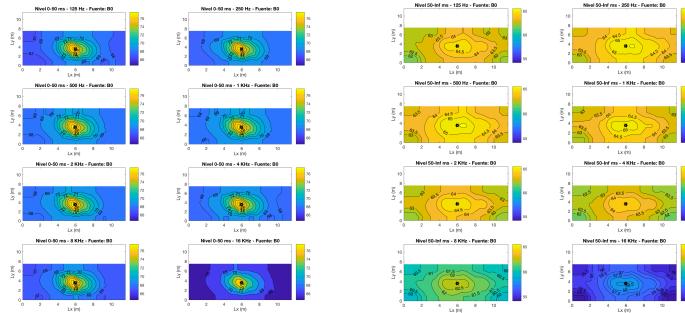


Figura A.8: Mapas de niveles por octavas para ambos campos acústicos del programa CATT2Matlab.

A.1.4. Otros detalles

Se han incluído una serie de funciones al programa para facilitar el trabajo con los datos y que no sea sólo una herramienta para mostrar datos.

- El programa permite exportar todos los datos a un archivo de Excel incluyendo todos los parámetros acústicos e historia temporal para todas las fuentes y receptores presentes.
- Las representaciones se pueden exportar directamente a múltiples formatos (.fig, .jpeg, .png, .pdf, etc)
- Las representaciones se pueden abrir en una ventana separada para poder utilizar todas las herramientas que ofrece Matlab para trabajar sobre las representaciones.
- Es posible generar un vídeo generando una representación por cada incremento de milisegundo desde 1 ms hasta el valor deseado.

A.2. EASEPostFile2Matlab

El programa EASEPostFile2Matlab permite trabajar con las historias temporales obtenidas con el programa EASE (versión 4.4) en Matlab. Para la obtención de estos archivos es necesario exportar los archivos de respuestas al impulso *.rsp* a texto plano, este proceso es largo debido a que se realiza receptor a receptor y no se realiza con todos a la vez, es por ello que junto al programa para Matlab se ha desarrollado un robot para realizar la tarea automáticamente. Tanto EASEPostFile2Matlab como la herramienta (el editable y el ejecutable) se encuentran disponibles en GitHub, aunque el desarrollo de EASEPostFile2Matlab no está finalizado es completamente funcional.

A continuación se describe brevemente tanto la herramienta de exportación como el programa EASEPostFile2Matlab.

A.2.1. Automatización de exportación

La herramienta para automatizar (robot) la exportación de las respuestas al impulso a texto plano se ha realizado con el programa WinAutomation. Permite programar una automatización de acciones (clics, pulsaciones de teclado, ejecuciones, etc) de forma sencilla.

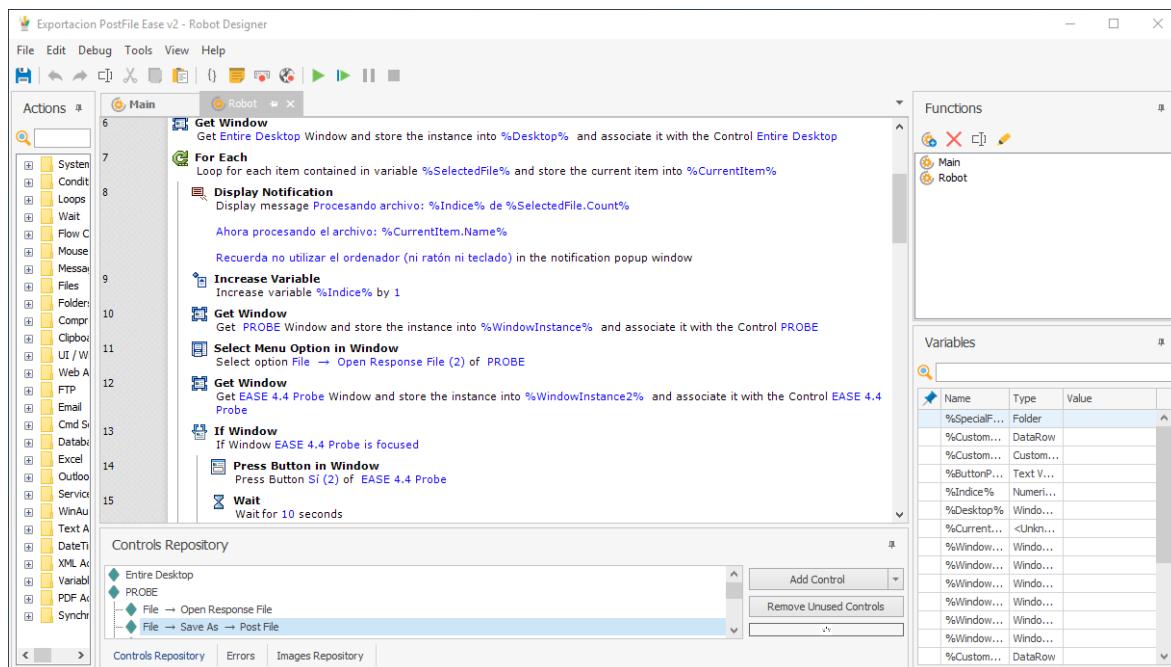


Figura A.9: Vista de desarrollo del robot con WinAutomation.

Para que el robot funcione correctamente debe estar en ejecución EASE y abierta la ventana de *Probe Post Processing*, al ejecutar la herramienta te indica este detalle y las opciones de exportación. Una vez ejecutado el robot solicita los archivos *.rsp* que se desean exportar, a qué formato (texto plano, *binaural impulse response* o wav) y en qué ubicación se guardarán los archivos (figura A.10). Una vez que el robot se encuentra en funcionamiento el ordenador

no puede ser utilizado hasta que finalice, si se utiliza el robot se parará.

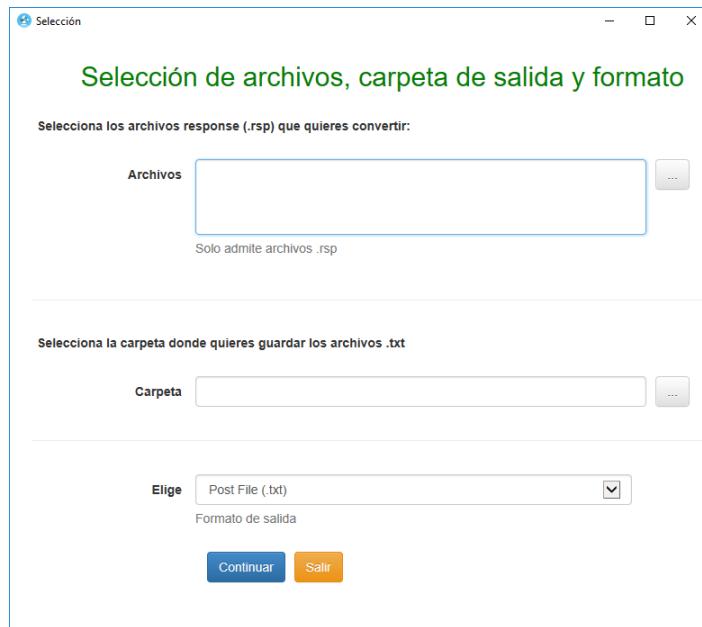


Figura A.10: Selección de archivos y tipo de exportación del robot desarrollado.

Es necesario que el idioma del ordenador donde se ejecute (sólo funciona en windows) sea español, debido a cómo se ha programado si está en otro idioma producirá errores.

De todos modos en GitHub se encuentra disponible el proyecto editable del robot donde fácilmente se puede modificar para ajustarlo a otros idiomas.

A.2.2. Programa

El programa EASEPostFile2Matlab importa y procesa las historias temporales exportadas con EASE y realiza algunas representaciones y cálculos. El programa no está totalmente desarrollado por lo que no tiene tantas funciones como CATT2Matlab pero es completamente funcional.

Una vez obtenidas las historias temporales en archivos de texto, en el programa EASEPostFile2Matlab se deben importar seleccionándolos todos ellos, el programa importa todos los datos contenidos en los archivos y automáticamente calcula algunos parámetros como la distancia de cada receptor a la fuente.

Entre los cálculos que realiza el programa se encuentran los realizados en este trabajo, la teoría revisada corregida. Es posible elegir el tiempo de integración, por defecto el intervalo es de 0 a 50 ms y de 50 ms a infinito, pero el valor de 50 ms se puede modificar desde 2 al máximo tiempo de la historia temporal (*valor máximo elegible*).

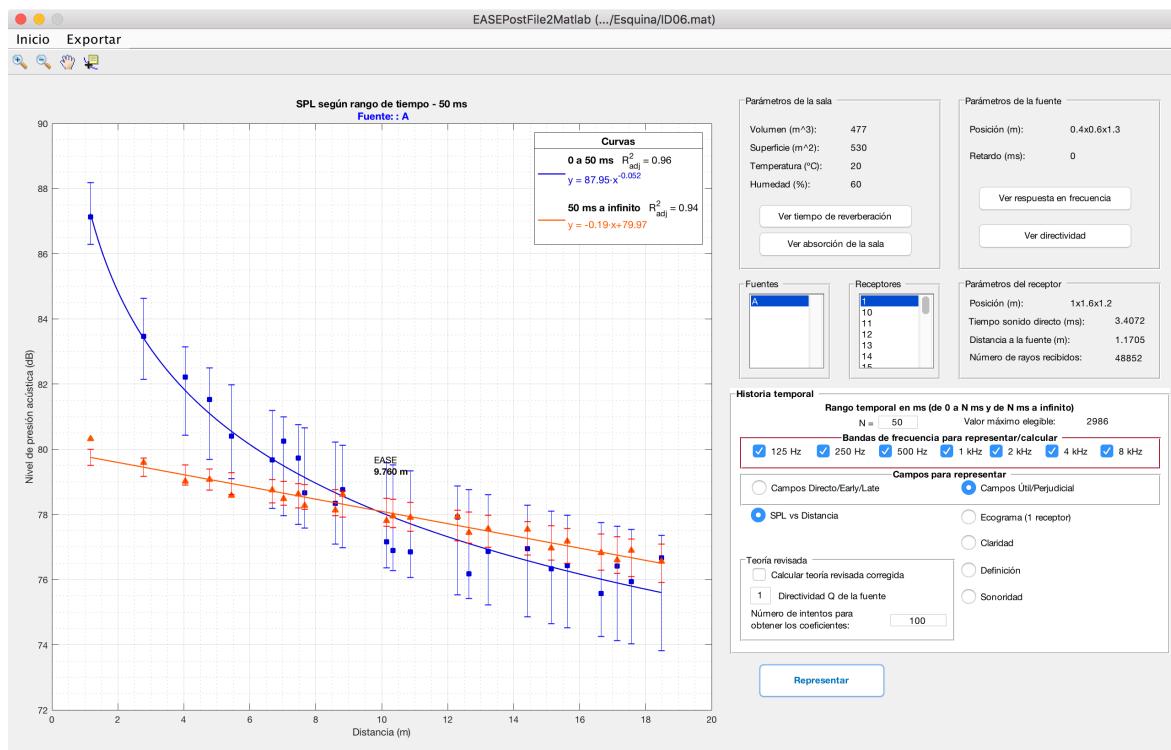


Figura A.11: Ventana completa del programa EASEPostFile2Matlab.

Se pueden representar los datos del recinto (absorción media o tiempo de reverberación) o de la fuente (respuesta en frecuencia o directividad). Las representaciones de historia temporal que se pueden realizar pueden incluir o no el cálculo con las ecuaciones de la teoría revisada corregida y se describen brevemente más adelante.

A.2.3. Datos generales

Al importar los archivos de historia temporal se muestran los detalles que incluyen estos archivos del siguiente modo:

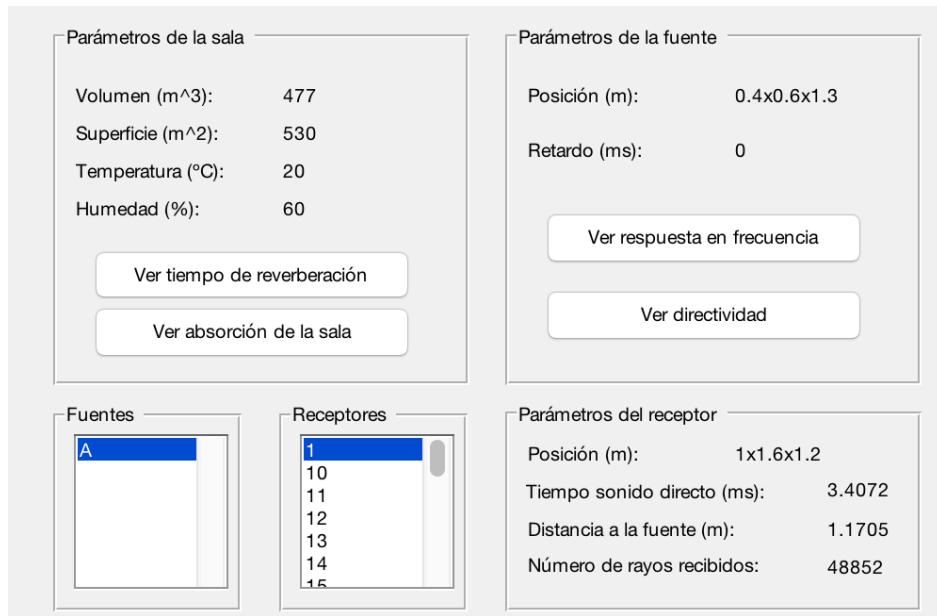


Figura A.12: Información general mostrada en EASEPostFile2Matlab.

Al seleccionar un receptor de la lista los parámetros de receptor se actualizan para mostrar la información del elegido.

A.2.4. Historia temporal

En las representaciones y cálculos que se pueden realizar es posible elegir bandas de octavas concretas en lugar de todo el espectro. También elegir el intervalo temporal que divide los campos acústicos.

SPL vs Distancia:

Representa los niveles de los dos campos acústicos junto a la teoría revisada corregida si se selecciona mostrando el valor de los coeficientes. Permite obtener los dos campos acústicos o obtener 3 campos (directo, temprano de 1 a tiempo de integración y tardío de tiempo de integración a infinito).

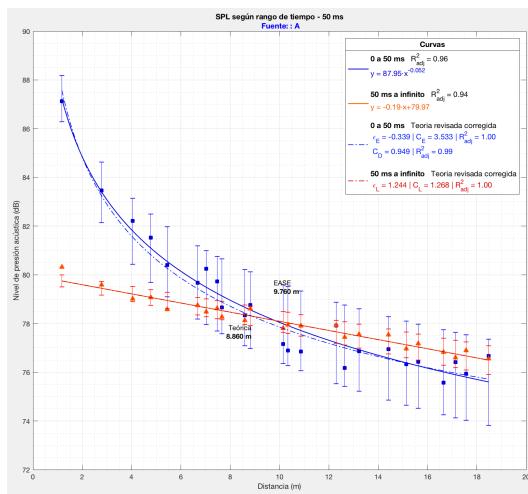


Figura A.13: Representación de niveles frente a la distancia junto a la teoría revisada corregida generada con EASEPostFile2Matlab.

Ecograma:

Representa el ecograma (nivel global) del receptor seleccionado.

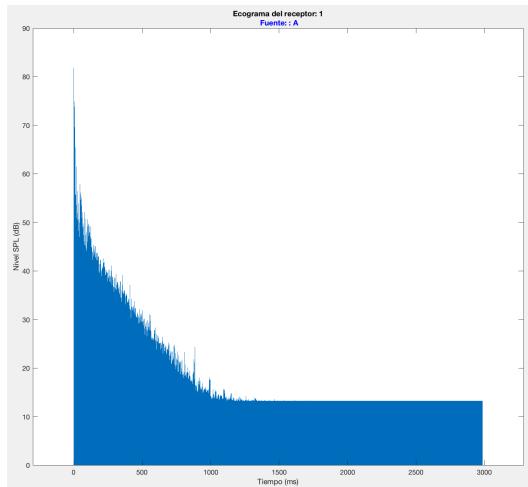


Figura A.14: Representación de un ecograma con EASEPostFile2Matlab.

Claridad, Definición y Sonoridad: Representa la claridad, definición o sonoridad calculados a través de las curvas obtenidas, es decir para todo el espectro y frente a la distancia, además permite calcular el mismo parámetro con la teoría revisada corregida.

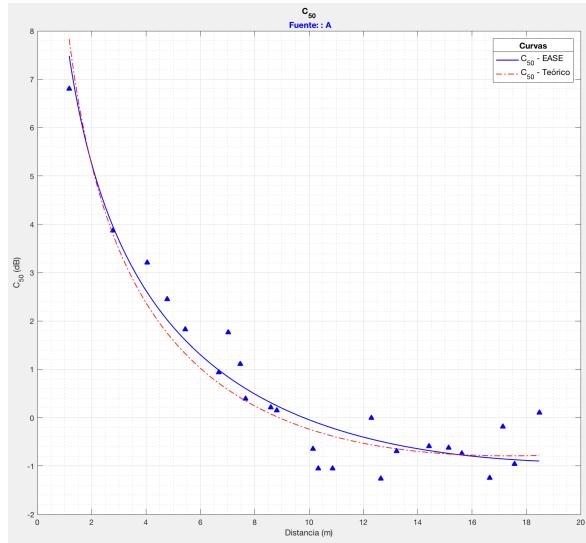


Figura A.15: Representación de claridad con EASEPostFile2Matlab.

A.3. dBFA2Matlab

Para procesar los datos de las medidas *in situ*, realizadas con el software dBTrig y exportadas a un archivo de texto para cada grupo de medidas con dBFA, se han desarrollado unos script para obtener las curvas de campo útil y perjudicial, y a través de estas curvas realizar la regresión para obtener los coeficientes de corrección para la teoría revisada corregida.

Código A.1: Líneas de código Matlab para introducir parámetros para el archivo con medidas de dBFA.

```

% Valor a analizar '0 a Val' (campo útil) y 'Val a infinito' (perjudicial)
t0 = 50; % (ms)
% Tiempo de campo directo (milisegundos)
tDir = 10;
% ¿Calcular teoría revisada?
CalcTeo = true;
% Parámetros teoría revisada
W = 0.0026; % Potencia acústica de la fuente. W
Q = 1; % Factor de directividad de la fuente
c = 343.4; % Velocidad de sonido en el aire. m/s
S = 530; % Superficie del recinto. m^2
V = 477; % Volumen del recinto. m^3
alpha = 0.1176; % Coeficiente medio de absorción
Zimp = 413.48; % Impedancia acústica del aire
%% Distancia Emisor-Receptor
% Posición de la fuente
% X Y Z
PosFuente = [0.4 0.6 1.3];
%Mallado de receptores.
% X Y Z
PosReceptor = [ 1 1.6 1.2; % Receptor 1
                 3 1.6 1.2; % Receptor 2
                 5.75 1.6 1.2; % Receptor 3
                 8 1.6 1.2; % Receptor 4
                 10.5 1.6 1.2]; % Receptor 5

```

Esta herramienta no tiene interfaz gráfica como las herramientas anteriores, los parámetros se deben escribir en el script, en concreto los datos a introducir son los mostrados en el código A.1.

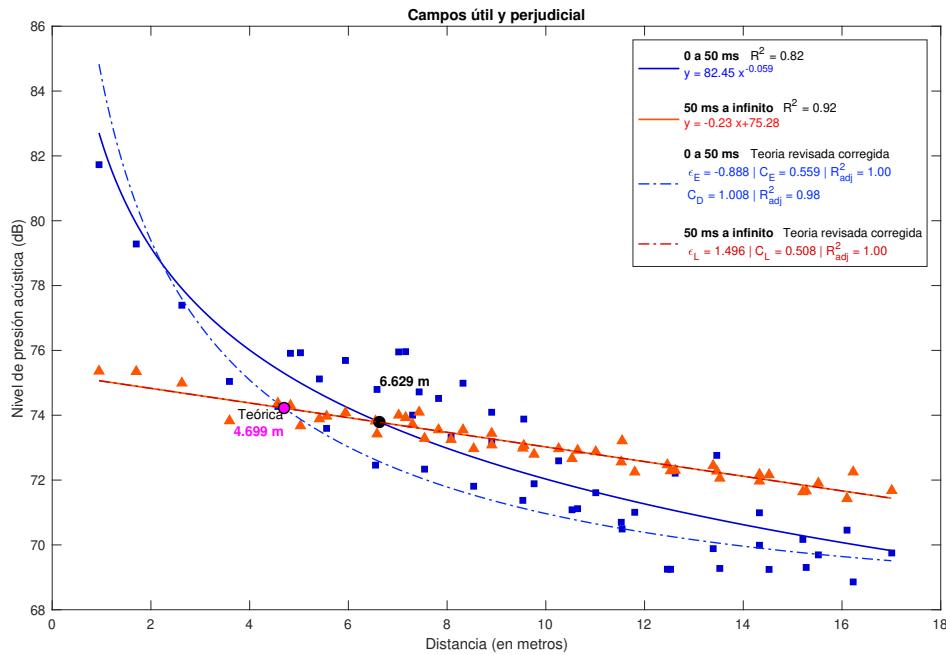


Figura A.16: Representación de curvas de medidas in situ y teóricas.

La herramienta es compatible con los sistemas MacOS y Windows, y con versiones de Matlab desde 2014 y está disponible en la plataforma GitHub.

B. Tablas de resultados

A continuación se muestran los datos y resultados obtenidos en el cálculo de coeficientes de corrección para la teoría revisada corregida (sección 2.4.3) en el caso de los recintos estudiados.

Se incluye en la tabla (las dos últimas columnas) la distancia donde se cortan el campo útil y el perjudicial, tanto para el caso de la simulación con EASE como para las curvas obtenidas mediante la teoría revisada corregida.

Fuente en el centro										Fuente en la esquina									
Factor de escala	V m ³	S m ²	̄ m ²	A _{Eyring}	Potencia acústica W	Q	T _{Eyring} s	c m/s	Z rayl	C _D	ε _E	C _E	ε _L	C _L	Cruce campos teórico m	Cruce campos EASE m			
0,5	62	128	0,118	16,517	0,00264	1	0,62	343,4	413,48	0,869	-3,553	0,909	0,980	1,262	-	-			
0,6	107	184	0,118	23,900	0,00264	1	0,75	343,4	413,48	0,791	-3,310	1,054	0,985	1,175	-	-			
0,7	170	251	0,118	32,534	0,00264	1	0,87	343,4	413,48	0,796	-3,341	1,118	1,004	1,121	-	-			
0,8	253	328	0,118	42,420	0,00264	1	0,99	343,4	413,48	0,839	-3,271	1,199	1,024	1,090	-	6,47			
0,9	361	415	0,118	53,681	0,00264	1	1,12	343,4	413,48	0,866	-2,998	1,325	1,058	1,087	4,25	5,36			
1	495	512	0,118	66,320	0,00264	1	1,24	343,4	413,48	0,937	-2,123	1,683	1,195	1,175	4,46	5,12			
1,1	659	619	0,118	80,209	0,00264	1	1,37	343,4	413,48	0,967	-1,250	2,083	1,256	1,175	4,75	5,11			
1,2	855	737	0,118	95,475	0,00264	1	1,49	343,4	413,48	1,025	-2,095	1,756	1,309	1,168	4,27	4,96			
1,3	1087	865	0,118	111,993	0,00264	1	1,62	343,4	413,48	1,028	-0,338	2,579	1,336	1,141	5,10	5,27			
1,4	1358	1003	0,118	130,012	0,00264	1	1,74	343,4	413,48	1,028	1,200	3,559	1,351	1,118	5,67	5,58			
1,5	1670	1152	0,118	149,157	0,00264	1	1,86	343,4	413,48	1,019	-1,176	2,334	1,373	1,101	5,03	5,46			
1,6	2027	1310	0,118	169,678	0,00264	1	1,99	343,4	413,48	1,018	1,154	3,693	1,381	1,077	5,97	5,89			
1,7	2431	1479	0,118	191,576	0,00264	1	2,11	343,4	413,48	1,012	-1,776	2,014	1,422	1,074	4,63	5,20			
1,8	2885	1658	0,118	214,851	0,00264	1	2,24	343,4	413,48	1,017	1,746	4,321	1,423	1,051	6,53	6,35			
1,9	3394	1848	0,118	239,376	0,00264	1	2,36	343,4	413,48	1,017	-0,425	2,944	1,477	1,059	5,87	6,15			
2	3958	2048	0,118	265,153	0,00264	1	2,49	343,4	413,48	1,017	0,087	3,182	1,486	1,045	6,03	6,09			

Tabla B.1: Resultados con el aula OP/S003 sin mobiliario simulada con EASE.

Factor de escala	V	S	m ²	$\bar{\alpha}$	A _{Eyring}	Potencia acústica	Q	T _{Eyring}	Fuente en el centro			Cruce campos EASE			
									W	m/s	Z	C _D	ε _E	C _L	ε _L
0.5	29	68	0.109	8.083	0.00264	1	0.59	343.4	413.48	0.821	-5.706	0.589	1.164	1.238	-
0.6	49	98	0.109	11.662	0.00264	1	0.70	343.4	413.48	0.869	-5.755	0.664	0.964	0.945	-
0.7	78	133	0.109	15.819	0.00264	1	0.82	343.4	413.48	0.951	-5.917	0.708	0.888	0.850	-
0.8	117	174	0.109	20.668	0.00264	1	0.94	343.4	413.48	0.966	-5.047	0.863	0.976	0.920	-
0.9	166	220	0.109	26.210	0.00264	1	1.05	343.4	413.48	0.966	-3.872	1.077	0.986	0.922	4.48
1	228	272	0.101	29.797	0.00264	1	1.27	343.4	413.48	0.965	-3.895	1.073	1.081	0.843	3.80
1.1	304	329	0.109	39.142	0.00264	1	1.29	343.4	413.48	0.964	-4.869	1.036	0.962	0.882	4.03
1.2	394	391	0.109	46.532	0.00264	1	1.40	343.4	413.48	0.963	-3.646	1.257	0.921	0.852	4.01
1.3	501	459	0.109	54.615	0.00264	1	1.52	343.4	413.48	0.962	-3.505	1.298	1.004	0.896	3.78
1.4	626	532	0.109	63.390	0.00264	1	1.64	343.4	413.48	0.961	-2.162	1.665	1.081	0.929	3.56
1.5	770	611	0.109	72.743	0.00264	1	1.76	343.4	413.48	0.961	-0.123	2.277	1.047	0.903	3.84
1.6	934	695	0.109	82.672	0.00264	1	1.87	343.4	413.48	0.960	-2.655	1.630	1.077	0.908	4.06
1.7	1121	785	0.109	93.411	0.00264	1	1.99	343.4	413.48	0.959	-0.943	2.116	1.119	0.917	4.43
1.8	1330	880	0.109	104.726	0.00264	1	2.11	343.4	413.48	0.961	1.478	3.101	1.137	0.914	4.58
1.9	1565	980	0.109	116.619	0.00264	1	2.22	343.4	413.48	0.958	0.890	2.782	1.160	0.913	4.43
2	1825	1086	0.109	129.205	0.00264	1	2.34	343.4	413.48	0.957	-0.239	2.493	1.179	0.911	4.48

Factor de escala	V	S	m ²	$\bar{\alpha}$	A _{Eyring}	Potencia acústica	Q	T _{Eyring}	Fuente en la esquina			Cruce campos EASE			
									W	m/s	Z	C _D	ε _E	C _L	ε _L
0.5	29	68	0.109	8.083	0.00264	1	0.59	343.4	413.48	1.355	-2.543	1.052	0.960	0.933	-
0.6	49	98	0.109	11.662	0.00264	1	0.70	343.4	413.48	1.280	-2.392	1.232	0.854	0.821	-
0.7	78	133	0.109	15.819	0.00264	1	0.82	343.4	413.48	1.201	-2.310	1.370	0.901	0.865	-
0.8	117	174	0.109	20.668	0.00264	1	0.94	343.4	413.48	1.003	-2.156	1.534	0.972	0.923	-
0.9	166	220	0.109	26.210	0.00264	1	1.05	343.4	413.48	1.024	-2.081	1.654	0.987	0.923	-
1	228	272	0.101	29.797	0.00264	1	1.27	343.4	413.48	1.046	-2.209	1.618	1.084	0.839	8.16
1.1	304	329	0.109	39.142	0.00264	1	1.29	343.4	413.48	0.941	-1.709	2.008	0.990	0.890	7.16
1.2	394	391	0.109	46.532	0.00264	1	1.40	343.4	413.48	0.937	-1.848	1.992	0.992	0.878	5.31
1.3	501	459	0.109	54.615	0.00264	1	1.52	343.4	413.48	0.924	-1.541	2.229	0.993	0.871	6.49
1.4	626	532	0.109	63.390	0.00264	1	1.64	343.4	413.48	0.905	-1.665	2.208	0.982	0.856	6.24
1.5	770	611	0.109	72.743	0.00264	1	1.76	343.4	413.48	0.871	-1.597	2.304	0.966	0.839	5.91
1.6	934	695	0.109	82.672	0.00264	1	1.87	343.4	413.48	0.895	-1.497	2.417	0.949	0.819	5.83
1.7	1121	785	0.109	93.411	0.00264	1	1.99	343.4	413.48	0.923	-0.861	2.952	0.924	0.802	6.41
1.8	1330	880	0.109	104.726	0.00264	1	2.11	343.4	413.48	0.922	-1.299	2.655	0.911	0.789	6.00
1.9	1565	980	0.109	116.619	0.00264	1	2.22	343.4	413.48	0.954	-1.220	2.758	0.891	0.774	6.12
2	1825	1086	0.109	129.205	0.00264	1	2.34	343.4	413.48	0.970	-1.017	2.965	0.866	0.757	6.41

Tabla B.2: Resultados con el aula EP/0-26M sin mobiliario simulada con EASE.