UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

ESCUELA POLITÉCNICA

Escuela Politécnica

Grado de Ingeniería en Sonido e Imagen de Telecomunicaciones

Trabajo Fin de Grado

Estudio de sala de control y estudio de grabación en la Escuela Politécnica

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

Grado de Ingeniería en Sonido e Imagen de Telecomunicaciones

Trabajo Fin de Grado

Estudio de sala de control y estudio de grabación en la Escuela Politécnica

Autor: Pablo Barrantes Pérez

Tutor: Valentín Gómez Escobar

Co-Tutor: Antonio Gordillo Guerrero

Tribunal

Presidente: Juan Miguel Barrigón Morillas

Secretario: Horacio Manuel González Velasco

Vocal: Rosendo Vílchez Gómez

Fecha:

Calificación:

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Índice general de contenidos III

Índice de tablas XI

Índice de figuras XVI

Resumen 1

1. Introducción 3

1.1 Motivación 3

1.2 Objetivos 4

2. Conceptos generales en acústica de salas 5

2.1. Propagación del sonido en recintos cerrados 5

2.1.1 Atenuación 5

2.1.2 Absorción 6

2.1.3 Reflexión 7

2.1.4 Difracción 8

2.1.5 Refracción 9

2.1.6 Sonido directo 9

2.1.7 Sonido reflejado 10

2.2. Criterios de diseño: Parámetros acústicos 13

2.2.1 Introducción 13

2.2.2 Nivel de presión sonora (SPL) 14

2.2.3 Ruido de fondo. Curvas de ruido 14

2.2.4 Tiempo de reverberación, TR 17

2.2.5 Early Decay Time, EDT 20

2.2.6 Relaciones Energéticas 22

2.2.6.1 Claridad de la voz, C_{50} 23

2.2.6.2 Claridad musical, C_{80} 24

2.2.7 Definición, D_{50} 26

2.2.8 Tiempo central, Ts 26

2.2.9 Sonoridad 27

2.2.9.1 Sonoridad, G 27

2.2.9.2 Sonoridad, S 28

2.2.10 Criterios de inteligibilidad 29

2.2.10.1 Índice de transmisión de la palabra, STI 30

2.2.10.2 RASTI o STI rápido 31

3. Conocimientos previos de diseño 33

3.1 Aislamiento acústico 33

3.1.1 Fugas de sonido y flanqueo 34

3.1.2 Materiales de construcción 36

3.1.3 Construcción de paredes 40

3.1.4 Construcción de suelos y techos 42

3.1.5 Construcción de ventanas y puertas 45

3.1.6 Cálculo del aislamiento acústico 51

3.6.1 Introducción 51

3.6.2 Aislamiento a ruido aéreo 52

3.6.3 Aislamiento a ruido aéreo de fachada 55

3.6.4 Aislamiento a ruido de impactos 58

3.2 Acondicionamiento Acústico 63

3.2.1 Modos y geometrías de salas 64

3.2.1.1 Frecuencia de corte de la habitación 65

3.2.1.2 Resonancias en salas 66

3.2.1.3 Modos axial, tangencial y oblicuo 68

3.2.1.4 Ecuación de los modos de sala 69

3.2.1.5 Distribución modal de salas no rectangulares 72

3.2.1.6 Conclusiones 74

3.2.2 Difusión 75

3.2.2.1 Difusores policilíndricos 77

3.2.2.2 Difusores de Schroeder 78

3.2.2.2.1 Difusores MLS 78

3.2.2.2.2 Difusores QRD 79

3.2.2.2.3 Difusores PRD 81

3.2.3 Absorción 82

3.2.3.1 Absorbentes porosos 83

3.2.3.2 Trampa de graves 84

3.2.4 Resonadores de membrana o diafragmáticos 85

3.2.5 Resonador acústico de Helmholtz 87

3.2.5.1 Resonadores simples de cavidad Helmholtz 87

3.2.5.2 Resonadores múltiples de cavidad a base de perforaciones o ranuras 88

3.3 Filosofía de diseño 91

3.3.1 Salas de Control 91

3.3.1.1 Non-Environment. Tom Hidley 91

3.3.1.2 Criterio LEDE. Davis 93

3.3.2 Salas de grabación 96

3.4 Metodología de diseño 99

3.4.1 Normativas y recomendaciones 99

3.4.2 Salas de control 100

3.4.3 Salas de grabación 102

4. Procedimiento de medición 105

4.1 Introducción 105

4.2 Equipamiento 105

4.3 Metodología 107

4.3.1 Métodos de medida 107

4.3.1.1 Método de la señal de ruido interrumpido 108

4.3.1.2 Método de la repuesta impulsiva 108

4.3.2 Posiciones del equipo de medición 109

4.3.2.1 Ruido de fondo 109

4.3.2.2 Tiempo de reverberación 110

4.3.2.3 Aislamiento a ruido aéreo 112

4.3.2.4 Aislamiento a ruido aéreo de fachada 114

4.3.2.5 Aislamiento a ruido de impactos 115

5. Comportamiento acústico del recinto 117

5.1 Información general del recinto 117

5.1.1 Ubicación 107

5.1.2 Características constructivas 119

5.1.3 Relación entre dimensiones 126

5.2 Mediciones del Aislamiento Acústico 131

5.2.1 Introducción 131

5.2.2 Ruido de Fondo 132

5.2.2.1 Introducción 132

5.2.2.2 Resultados 134

5.2.2.3 Conclusiones 134

5.2.3 Tiempo de reverberación 136

5.2.3.1 Sala de Grabación 136

5.2.3.2 Sala de Control 138

5.2.3.3 Conclusiones 143

5.2.4 Aislamiento a ruido aéreo entre recintos interiores 140

5.2.4.1 Aislamiento entre sala de grabación y control 140

5.2.4.1.1 Informe de ensayo 140

5.2.4.1.2 Interpretación de resultados 141

5.2.4.2 Aislamiento de la pared principal 144

5.2.4.2.1 Informe de ensayo 145

5.2.4.2.2 Interpretación de resultados 146

5.2.5 Aislamiento a ruido aéreo de fachadas 153

5.2.5.1 Informe de ensayo 153

5.2.5.2 Interpretación de resultados 155

5.2.6 Aislamiento a ruido de impactos 157

5.2.6.1 Informe de ensayo 158

5.2.6.2 Interpretación de resultados 159

5.3 Medida del Criterio de Salas 161

5.3.1 Tiempo de reverberación, T_{30} 163

5.3.2 Tiempo de caída inicial, EDT 166

5.3.2.1 Comparación entre TR y EDT 167

5.3.3 Definición, D_{50} 168

5.3.4 Claridad de voz, C_{50} 171

5.3.5 Claridad musical, C_{80} 173

5.3.6 Inteligibilidad 177

5.3.7 Resumen y valoración 179

5.3.7.1 Resumen 179

5.3.7.2 Valoración de las salas 180

6. Simulación en Catt Acoustic v9.1b 181

6.1 Modelado acústico por ordenador 181

6.1.1 Introducción 181

6.1.2 Diseño del modelado 182

6.1.2.1 Geometría 182

6.1.2.2 Definición de superficies. Materiales 186

6.1.2.3 Posiciones de fuente y micrófono 188

6.2 Validación del modelo 189

6.2.1 JND 190

6.2.2 Resultados mediante predicción/Aura 191

6.2.2.1 Tiempo de reverberación, TR_{30} 191

6.2.2.2 Tiempo de caída inicial, EDT 194

6.2.2.3 Definición, D_{50} 197

6.2.2.4 Claridad de voz, C_{50} 199

6.2.2.5 Claridad musical, C_{80} 201

6.2.2.6 Índice de Transmisión del Habla, STI 203

6.3 Conclusiones 205

7. Propuesta de mejora acústica mediante simulación 207

7.1 Introducción 207

7.2 Caracterización del recinto 208

7.3 Resultados mediante predicción/Aura 210

7.3.1 Tiempo de reverberación, TR_{30} 210

7.3.2 Tiempo de caída inicial, EDT 213

7..3.3 Definición, D_{50} 214

7.3.4 Claridad de voz, C_{50} 216

7.3.5 Claridad musical, C_{80} 218

7.3.6 Índice de Transmisión del Habla, STI 220

8. Sonorización del estudio de grabación 223

8.1 Introducción 223

8.2 Equipamiento 223

8.2.1 Preamplificador de micrófono 224

8.2.2 Interfaz de audio 225

8.2.3 Ordenador 226

8.2.4 Micrófonos 227

8.2.5 Monitorización 228

8.2.5.1 Monitores 228

8.2.5.2 Centro de control de monitores 229

8.2.5.3 Amplificador de auriculares 230

8.2.5.4 Auriculares 230

8.2.6 Generador de reloj 231

8.2.7 Patch Pannel 231

8.2.8 Wall Box 232

8.3 Equipamiento auxiliar 235

8.3.1 Superficie de control 235

8.3.2 Teclado MIDI 235

8.3.3 DSP FireWire 236

8.4 Mobiliario Workstation 237

8.5 Instalación de audio 238

8.5.1 Niveles de señal 238

8.5.2 Tipos de señal 239

8.5.3 Cableado y conectores 240

8.5.4 Interconexión 246

8.6 Planos 263

8.6.1 Diagrama “Patch Pannel” 263

8.6.2 Diagrama “Conexionado” 264

9. Conclusiones generales 265

Referencias Bibliográficas 271

Anexo A. Sistema de medidas dBBatti32 275

Anexo B. Síntesis de los resultados medidos 279

Anexo C. Catt Acoustic v9.1b 315

Anexo D. Materiales para propuesta de mejora 333

Anexo E. Datos geométricos de la simulación 336

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes 17

Tabla 2. Valores recomendaos de TRmid en función del tipo de sala 18

Tabla 3. Valoración de la inteligibilidad de una sala en función del STI 30

Tabla 4. Nivel normalizado de presió snora de impacto de un suelo de referencia 59

Tabla 5. Nivel normalizado de presión sonora de impactos de un suelo de referencia 59

Tabla 6. TR_{mid} medido en la sala vacía. 165

Tabla 7. Valores de EDT medidos. 166

Tabla 8. Valores promedios de definición para las dos salas. 169

Tabla 9. Valores de $C_{50avergafe}$ medido. 172

Tabla 11. Valores RASTI y STI en la sala de grabación. 174

Tabla 12. Valores RASTI y STI en la sala control. 177

Tabla 13. Resumen valoración acústica del estudio de grabación. 178

Tabla 14. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados. 179

Tabla 15. Parámetros acústicos con su JND asociado. 187

Tabla 16. T30 (s) medido vs simulado en sala de grabación mediante predicción. 190

Tabla 17. T30 (s) medido vs simulado en sala de control mediante predicción. 192

Tabla 18. Valores de EDT (s) medido vs simulado en sala de grabación. 194

Tabla 19. Valores de EDT medido vs simulado en sala de control. 185

Tabla 20. D50 (%) medido vs simulado en sala de grabación con TUCT. 197

Tabla 21. D50 (s) medido vs simulado en sala de control con TUCT. 198

Tabla 22. C50 (dB) medido vs simulado en sala de grabación con TUCT. 200

Tabla 23. C50 (dB) medido vs simulado en sala de control con TUCT. 200

Tabla 24. C80 (dB) medido vs simulado en sala de grabación con TUCT. 201

Tabla 25. C80 (dB) medido vs simulado en sala de control con TUCT. 202

Tabla 26. STI medido vs simulado en sala de grabación mediante predicción TUCT. 203

Tabla 27. STI medido vs simulado en sala de control mediante predicción TUCT. 204

Tabla27A. Mejora T30 (s) en sala de grabación. 212

Tabla 28. Mejora T30 (s) en sala de control. 212

Tabla 29. Mejora EDT (s) en sala de grabación. 213

Tabla 30. Mejora EDT (s) en sala de control .214

Tabla 31. Mejora D50 (s) en sala de grabación. 215

Tabla 32. Mejora D50 (s) en sala de control. 215

Tabla 33. Mejora C50 (dB) en sala de grabación 216.

Tabla 34. Mejora C50 (dB) en sala de control. 217

Tabla 35. Mejora C80 (dB) en sala de grabación. 219

Tabla 36. Mejora C80 (dB) en sala de control .219

Tabla 37. Comparativa de valoraciones del STI. 221

Tabla 38. Mejora del STI en sala de control. 221

Tabla 39. Nivel de señales. 239

Tabla 40. Conexionado de patch pannel en Sala A. 247

Tabla 41. Conexionado del patch pannel 1. 247

Tabla 42. Conexionado Patch Pannel 2 en sala de control. 248

Tabla 43. Conexionado de entrada preamplificadores de micrófono 250.

Tabla 44. Conexionado de salida preamplificadores de micrófono. 251

Tabla 45. Conexionado de entrada de la Interfaz de Audio 252

Tabla 46. Conexionado de salida de la Interfaz de Audio 253

Tabla 47. Conexionada transferencia de datos IA 828 MKII Hybrid 253

Tabla 48. Conexionado de entrada control de monitores 254

Tabla 49. Conexionado de salida control de monitores 254

Tabla 50. Conexionad de entrada Mixer. 255

Tabla 51. Conexionad de salida Mixer. 255

Tabla 52. Conexionado monitor campo cercano (main L-R). 256

Tabla 53. Conexionado monitor SISTEMA PA (L - R). 256

Tabla 54. Conexionado de entrada Machine. 257

Tabla 55. Conexionado de salida Machine 257

Tabla 55. Conexionado de transmisión de datos digitales Machine. 257

Tabla 58. Conexionado de transmisión de datos digitales Teclado Kontrol. 258

Tabla 59. Conexionado de entradas PC. 258

Tabla 60. Conexionado de salidas PC. 259

Tabla 61. Conexionado de transmisión de datos PC. 259

Tabla 63. Conexionado de entrada Monitor TFT sala A. 260

Tabla 64. Conexionado de entradas generados de reloj 261

Tabla 65. Conexionado de salidas generador de reloj. 279

Tabla B1. Nivel del ruido de fondo en bandas de tercio de octava en las salas de control y grabación. 280

Tabla B2. TR medido en bandas de tercio de octava cuando se mide con la fuente en la posición 1 280

Tabla B3. TR medido en bandas de tercio de octava fuente en la posición 2. 281

Tabla B4. TR promedio para las dos posiciones de fuente. 281

Tabla B5. TR medido en bandas de tercio de octava cuando se mide con la fuente en la posición 285

Tabla B6. TR medido en bandas de tercio de octava cuando se mide con la fuente en la posición2. 286

Tabla B7. TR promedio para las dos posiciones de fuente. 288

Tabla B8. Cálculo de valores de las diferencias de niveles estandarizada, ponderada A. 290

Tabla B9. Cálculo de la diferencia de nivel estandarizada ponderada del elemento de291 separación común. 292

Tabla B10. Cálculo de los valores C y C_{tr} para la diferencia de niveles estandarizada, D_{nT}. 293

Tabla B11. Términos de adaptación espectral ampliados para la diferencia de niveles estandarizada $D_{n,T,A.}$ 293

Tabla B12. Cálculo de los índices de reducción acústica de la ventana acústica de observación 294

Tabla B13. Cálculo de los valores C y Ctr para el índice de reducción sonora de la ventana, R. 295

Tabla B14. Términos de adaptación espectral ampliados para los índices de reducción acústica de la ventana. 296

Tabla B15. Cálculo de los índices de reducción acústica del tabique de PYL .297

Tabla B17. Valores de la diferencia de niveles estandarizada ponderado, DnT, w. 298

Tabla B18. Términos de adaptación espectral ampliados para la diferencia de niveles estandarizada. 299

Tabla 19. Índices de reducción acústica del tabique de PYL. 300

Tabla B20. Índices de reducción sonora de la puerta acústica. 300

Tabla B21. Términos de adaptación espectral ampliados de la reducción acústica del elemento de separación vertical global……302

Tabla B22. Valores del nivel recibido con corrección del ruido de fondo……303

Tabla B23. Diferencia de niveles estandarizada para el método global en fachadas…… 304

Tabla B24. Diferencia de niveles estandarizada para ruido aéreo con ponderación A…… 304

Tabla B25. Diferencia de niveles estandarizada para ruido aéreo con ponderación A…… .305

Tabla B26. Índices globales de reducción acústica de la muestra de ensayo…… 306

Tabla B27 Términos de adaptación espectral ampliados de la muestra de ensayo…… 306

Tabla B28. Valores obtenidos del nivel de presión acústica estandarizado del ruido de impactos…307

Tabla B29. Cálculo de la magnitud global de presión acústica ponderada, $L_{nT,w}$…… .308

Tabla B30. Cálculo del término de adaptación espectral para ruido de impactos, CI…… 310

Tabla B31. Cálculo de la contribución de la máquina de impactos al ruido aéreo…….. 309

Tabla B32. Valores del TR en la sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava……. 311

Tabla B33. Valores del TR en la sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava……. 312

Tabla B34. Valores del EDT en sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava…….. 312

Tabla B35. Valores del EDT en sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava…… 312

Tabla B36. Valores D-50 en sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava……..313

Tabla B37. Valores D-50 en sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava……...313

Tabla B38. Valores C80 en sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava……...314

Tabla B39. Valores C80 en sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava…….314

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reflexiones especulares …… 21

Figura 2. Difusión del sonido …… 22

Figura 3. Ecograma asociado a un receptor …… 25

Figura 4. Curvas NC …… 28

Figura 5. EDT …… 34

Figura 6. Valoración de la inteligibilidad en función del C_{50} (sala ocupada) …… 37

Figura 7. Valores de C80 recomendados por Marshall (sala ocupada) …… 38

Figura 12. Esquema de cómo deberían ser montadas las cajas de salida para conservar el aislamiento de una pared …… 56

Figura 13. Construcción de tres estructuras comunes de suelo/techo y comparación de la pérdida de transmisión …… 64

Figura 14. Construcción de bajo coste para suelos flotantes de madera …… 65

Figura 15. Detalles de un ejemplo de construcción de una ventana de observación …… 66

Figura 16. Comparación de la pérdida de transmisión en dos ventanas de doble panel. Línea continua: panel de 0.3 y 0.2 cm. Línea discontinua: panel de 1.5 y 0.75 cm. *(Sabine 1975)* .. 67

Figura 17. Comparación entre resonancia masa-aire-masa y caída de coincidencia (Quirt,1982)…… 69

Figura 18. Distribución del espectro en función de una frecuencia crítica. …… 71

Figura 19. Ejemplo de respuesta de baja frecuencia del sonido en una sala pequeña …… 74

Figura 20. Resonancias modales entre paredes paralelas en una habitación. …… 75

Figura 21. Comparación de modos axial, tangencial y oblicuo …… 76

Figura 22. Diagrama de los tres primeros modos axiales a lo largo de una habitación. …… 78

Figura 23. Efecto del ensanchamiento de paredes en modos de distribución de salas …… 80

Figura 24. Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión y difusor. …… 82

Figura 25. Diagrama del efecto de lobulación del sonido en difusores …… 83

Figura 26. Ejemplo de difusor policilíndrico …… 84

Figura 27. Difusor MLS …… 85

Figura 28. Difusor QRD unidimensional …… 87

Figura 29. Difusor bidimensional …….…. 88

Figura 30. Difusor PR …… 89

Figura 31. Diseño de una trampa de graves con diagrama de la velocidad de las partículas del aire y presión del sonido en un cuarto de longitud de onda desde la parte trasera de la trampa …… 92

Figura 32. Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático. …… 93

Figura 33. Esquema básico de un resonador simple de cavidad Helmholtz …… 94

Figura 34. Esquema básico de un resonador múltiple de cavidad Helmholtz a base de paneles perforados o ranurados …….. 96

Figura 35. Planta de sala de control Non-Environment …… 97

Figura 36. Principio de diseño RFZ de Peter D`Antonio …… 101

Figura 37. Esquema de montaje para realizar las medidas …… 107

Figura 38. Puntos de medida para el cálculo del TR para la fuente 1…… .111

Figura 39. Puntos de medida para el cálculo del TR para la fuente 2 …… 112

Figura 40. Posiciones Fuente-Micro para cálculo Ruido Aéreo tabique Salas … …… 113

Figura 41. Posiciones Fuente-Micro para cálculo Ruido Aéreo tabique principal…….. 113

Figura 42. Posiciones Fuente-Micro para cálculo Ruido Aéreo en la Fachada …… 115

Figura 43.Posiciones Maquina de Impacto-Micro para cálculo a Ruido de Impactos …….. 117

Figura 44. Vista aérea de la zona donde ha sido construido …….. 119

Figura 45. Fachada del sótano donde se ha construido el estudio de grabación …… 120

Figura 46. Instalación común de placas de yeso y suelo flotante …….. 121

Figura 47. Detalle constructivo del tabique principal …… 122

Figura 48. Detalle constructivo del suelo flotante …… 123

Figura 49. Puertas metálicas instaladas …….. 124

Figura 50. Ventanas acústicas instaladas …… 125

Figura 51. Vista en planta de la geometría del estudio de sonido …….. 126

Figura 52. Diagrama de Bolt sala de control …… 127

Figura 53. Criterio de Bonello de la sala de control …… 128

Figura 54. Densidad modal de la sala de contro ……. 128

Figura 55. Distribución modal de la sala de grabación…… 129

Figura 56. Criterio de Bonello para la sala de grabación …… 129

Figura 57. Gráfica de los valores medios del nivel equivalente de ruido de fondo medido .. 131

Figura 58. Representación de las curvas NC y el ruido de fondo equivalente en dB ……. 131

Figura 59. Gráfica del TR total de la sala de grabación por cada banda de frecuencias ……. 138

Figura 60. Gráfica del TR total de la sala de control por cada banda de frecuencias …… 144

Figura 61. Gráfica del TR recibido en las posiciones de micrófono…….. 135

Figura 62. Tabique separador entre salas …… 146

Figura 63. Esquema de posiciones de fuentes y micrófonos ……. 147

Figura 64. Gráfica de la diferencia de niveles estandarizada global ……. 161

Figura 65. Gráfica del índice de reducción sonora, de la ventana acústica …… 163

Figura 66. Tabique principal de entrada al estudio de grabación …… 164

Figura 67. Esquema de posiciones de fuentes y micrófonos ……. 165

Figura 68. Gráfica de la diferencia de niveles estandarizada global ……. 174

Figura 69. Gráfica del índice global de reducción acústica, R (dB), de la puerta acústica …. 175

Figura 70. Aislamiento a ruido aéreo en fachadas ……. 176

Figura 71. Esquema de posiciones de fuentes y micrófonos …….. 177

Figura 72. Gráfica del índice de reducción acústica R45 de la ventana en fachada …….. 186

Figura 73. Máquina de Impactos …… 186

Figura 74. Esquema de posicionamiento para el aislamiento a ruido de impactos ……. 159

Figura 75. Gráfica de los valores obtenidos para la presión acústica estandarizada del ruido de impactos, LnT …… 161

Figura 76. Gráfica del tiempo de reverberación para las dos salas mediante el criterio de calidad……164

Figura 77. Gráfica de EDT para las dos salas mediante el criterio de calidad……165

Figura 78. Comparación del TR y el EDT en la sala de grabación……166

Figura 79. Comparación del TR y el EDT en la sala de grabación……167

Figura 80. Gráfica de valores D_{50} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de grabación…….. 168

Figura 81. Gráfica de valores D_{50} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de control.

Figura 82. Valores D_{50} (s) medidos…….. 169

Figura 83. Valores de C_{50} medidos…… 173

Figura 84. Gráfica de valores C_{80} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de grabación…… 174

Figura 85. Gráfica de valores C_{80} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de control 175

Figura 86. Gráfica del promedio de claridad musical, C_{80} para las dos salas 176

Figura 87. Gráfica de valores STI y RASTI para cada posición de micrófono en sala de grabación …… 177

Figura 88. Gráfica de valores STI y RASTI para cada posición de micrófono en salade control. 178

Figura 88. Vista en planta del recinto 183

Figura 89. Vista perfil ventana acústica sala de grabación. 184

Figura 90. Vista perfil del tabique de separación entre salas. 184

Figura 91. Modelo virtual del estudio de grabación en Catt Acoustic. 185

Figura 92. Vista en planta, alzado y perfil del modelo de simulación. 186

Figura 93. Gráfica de valores del coeficiente de absorción de los materiales. 187

Figura 94. Posiciones de fuentes y micrófonos. 188

Figura 95. Gráfica de estimaciones del TR en sala de grabación. 191

Figura 96. Gráfica de Estimaciones del TR en sala de control. 192

Figura 97. EDT (s) medido vs simulado en sala de grabación con predicción. 195

Figura 98. EDT (s) medido vs simulado en sala de control con predicción. 196

Figura 99. D50 (s) medido v simulado en sala de grabación con TUCT. 197

Figura 100. D50 (s) medido v simulado en sala de control con TUCT. 198

Figura 101. C50 (dB) medido v simulado en sala de grabación con TUCT. 199

Figura 102. C50 (dB) medido v simulado en sala de control con TUCT. 200

Figura 103. C80 (dB) medido v simulado en sala de grabación con TUCT. 201

Figura 104. C80 (dB) medido vs simulado en sala de control con TUCT 202

Figura 105, STI medido en sala de grabación mediante TUCT. 204

Figura 106. STI medido vs simulado en sala de control mediante predicción TUCT. 205

Figura 107. Vista en alzado 3-D del diseño de acondicionamiento acústico del estudio de sonido……. 208

Figura 108. Vista en perfil 3-D del diseño de acondicionamiento acústico de la sala de control. 209

Figura 109. Gráfica de mejora del T30 mediante estimacion del TR en sala de grabación. 211

Figura 110. Gráfica de mejora del T30 mediante estimación del TR en sala de control. 212

Figura 111. EDT (s) y T30 (s) simulado vs mejorado mediante predicción TUCT en sala grabación…….. 213

Figura 112. EDT (s) simulado vs mejorado mediante predicción TUCT en sala de control. 214

Figura 113. D50 (s), comparativa mejora mediante predicción TUCT en sala grabación. 215

Figura 114. Gráfica comparativa del diseño de mejora D-50. 216

Figura 115. C50 (dB), comparativa mejora mediante predicción TUCT en sala grabación. 217

Figura 117. C80 (dB), comparativa mejora mediante predicción TUCT en sala grabación. 218

Figura 118. Gráfica comparativa del diseño de mejora C80 (dB). 220

Figura 119. Gráfica comparativa de la valoración del STI. 221

Figura 120. Disposición de los monitores de campo cercano. 229

Figura 121. Ejemplo de Patch pannel. 231

Figura 122. Chasis wall box. 233

Figura 123. Panel frontal wall box. 234

Figura 124. Superficie de control. 235

Figura 125. DSP firewire Liquid MIX. *(focusrite)* 236

Figura 126. Sessiondesk Gustav Workstation. *(Studio desk)* *238*

Figura 126. Composición interna de los cables a utilizar. 240

Figura 127. Conector XLR. 241

Figura 128. Conector TS y TRS. 242

Figura 129. Conector RCA. 242

Figura 130. Conector Toslink. 243

Figura 131. Cable FireWire 800, conector macho. 243

Figura 133. Pines del conector DIN-5 MIDI. 244

Figura 134. Conector USB, tipo A (izquierda) y tipo B (derecha) de 4 pines. 245

Figura 135. Conector BNC. 245

Figura 136. Conector HDMI 245

Figura 137. Leyenda del tipo de señales 246

Figura 138. Diagrama de conexionado Patch Pannel. 263

Figura 139. Plano Esquema conexionado del estudio de grabación 264

Figura B1. Gráfica del TR promedio de las dos posiciones de fuente. 281

Figura C1. Preferencias por defecto. 315

Figura C2. Warning options. 316

Figura C3. Diálogo principal de modelado. 318

Figura C4. Cuadro de dialogo para la configuración general. 319

Figura C5. Ventana del acoustic environment 320

Figura C6. Cuadro de dialogo para la verificación de geometría. 321

Figura C7. Interactive RT estimation. 322

Figura C8. Estadísticas de los materiales 323

Figura C9. Ventana de configuración y simulalación para predicción. 324

Figura C11. Detalles de la respuesta al impulso en espectograma. 327

Figura C12. Detalles del renderizado de pixeles. 327

Figura C13. Detalles del rendenderizado de superficies 328

Figura C14. Detalles de las reflexiones mediante el modelo de imágenes. 329

Figura D1. Gráfica del coeficiente de absorción acústica de los paneles absorbentes. 331

Figura D2. Gráfica del coeficiente de absorción acústica de las trampas de graves (cubo). 332

Figura D3. Gráfica del coeficiente de absorción acústica de la trampa de graves (greus). 333

FiguraD4. Gráfica del coeficiente de absorción de cortinas acústicas- 334

RESUMEN

Este trabajo pretende estudiar el comportamiento del diseño de un estudio de grabación situado en la Escuela Politécnica de Cáceres.

Se ha realizado un amplio trabajo bibliográfico estudiando libros de diseño de estudios de grabación sonora existentes en inglés y así rescatar de ellos los aspectos más importantes, y así adquirir unos conocimientos previos.

La valoración del comportamiento acústico se ha llevado a cabo obteniendo los datos con los equipos de medida y su extracción con el software dBBatti32. El cálculo de los parámetros de aislamiento acústico se han seguido las pautas de las normativas ISO, para su valoración se han observado las exigencias del documento básico de protección frente al ruido del CTE (DB-HR) y comprobar si cumplen con los valores mínimos recomendados para estudios de grabación musical.

Seguidamente, se ha diseñado una propuesta de mejora acústica de la sala de control y estudio de grabación con el programa Catt Acoustic v9.1b. Para ello primeramente se validaron las medidas realizadas in situ con las obtenidas en la simulación.

Finalmente, se explica el equipamiento y el diseño de conexionado de los diferentes equipos de sonido que se han instalado en el estudio de grabación musical de la Escuela Politécnica de Cáceres, UEX.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

Una de las principales fuentes de inspiración, disfrute y evasión de problemas para el ser humano es la música. En mi opinión, es un pilar muy importante en la vida, por lo que considero muy importante la calidad de las grabaciones, producciones y mezclas que se pueden llevar a cabo en estudios de sonido.

La construcción del estudio de sonido llevado a cabo en la Escuela Politécnica de Cáceres es una motivación extra, debido a que está ubicado dónde he realizado mis estudios, podré compartir mis conocimientos adquiridos en este trabajo para la mejora del desarrollo y diseño del estudio de sonido.

Este trabajo surge de la motivación producida por la pasión a la música y la causada durante el cuarto curso en la asignatura de Aislamiento y Acondicionamiento Acústico, impartida en el Grado de Ingeniería de Telecomunicaciones. Por lo tanto, pude fusionar mi pasión y la gran experiencia adquirida en acústica arquitectónica para realizar este trabajo fin de grado con toda la motivación posible.

1.2 Objetivos

En vista de que hay muy poca información relacionada con el diseño de estudios de grabación en español y el comportamiento acústico de ellos, el objetivo principal de este trabajo fin de grado ha sido recoger toda la información relacionada con el diseño y valoración de estudios de sonido que permitan al ingeniero acústico seguir un método acústico apropiado para un correcto diseño y valoración para proponer mejoras acústicas.

Los objetivos de este trabajo han sido la valoración del comportamiento acústico del estudio de grabación para adquirir conocimientos de los equipos de medida y en la aplicación de normativas, y así poder realizar una propuesta de mejora mediante la comprensión de un software basado en acústica.

Finalmente, la instalación del conexionado de equipos tiene como objetivo adquirir conocimientos de ingeniería de sonido en estudios de grabación y facilitar una correcta instalación en este tipo de recintos.

2. CONCEPTOS GENERALES EN ACÚSTICA DE SALAS

2.1 Propagación del sonido en recintos cerrados

Se van a explicar los factores que van a influir en la calidad final del sonido debido a la importancia de conocer cómo se propaga la onda sonora en un recinto y como le afecta la variación de algunos factores como la estructura del lugar donde se va a realizar la actuación.

Para analizar el comportamiento del sonido en el interior de una sala, se parte de una fuente puntual omnidireccional (radia por igual en todas direcciones), situada en el interior de un recinto que emite un impulso.

Un receptor ubicado en un punto cualquiera del recinto recibe dos tipos de sonido: el sonido directo, es decir, aquel que llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencia y el sonido indirecto o reflejado originado como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda sonora al incidir sobre las superficies límite del recinto. En este contexto cabe destacar los siguientes fenómenos acústicos:

2.1.1 Atenuación

Es la pérdida de energía de las ondas sonoras que produce en cualquier propagación y depende de la distancia que recorra la onda. Se describe por la ley cuadrática inversa, según la cual la intensidad en un punto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco emisor. La intensidad sonora

disminuye a 6 dB al duplicarse la distancia, si la propagación se produce en campo libre, es decir, no le afectan otros fenómenos. [1]

2.1.2 Absorción

Se trata de la transformación de la energía sonora en cualquier otra forma de energía, fundamentalmente calorífica, producida tanto en su propagación a través del aire como al incidir sobre las superficies límite del recinto.

Esta variación de energía dependerá de la intensidad de la onda sonora, de la distancia recorrida y de las características del medio de propagación. Es una magnitud escalar cuyo efecto en el campo sonoro revertirá en una disminución de la intensidad sonora.

Esta reducción energética tiene como principales causas la presencia de público, materiales absorbentes y resonadores que revisten la sala, las superficies límites del recinto susceptibles de entrar en vibración (como puertas, ventanas, paredes ligeras, etc.), el aire y los materiales rígidos y no porosos (elementos constructivos como cemento y hormigón). Es por eso que resulta vital disponer de los coeficientes de absorción, α, de los materiales presentes en un recinto para realizar cualquier estudio acústico.

$$\alpha = \frac{\text{Energía Absorbida}}{\text{Energía Incidente}} \qquad (1)$$

El factor de absorción depende de la frecuencia de la onda y describe el porcentaje de energía sonora que es absorbida por la superficie. [1]

2.1.3 Reflexión

Es el fenómeno que se produce cuando una onda sonora incide sobre una superficie que no puede rodear ni traspasar, es decir, cuando la longitud de la onda es menor que el objeto. La reflexión depende de cómo sea la superficie sobre la que incide.

Reflexión especular

Se produce cuando la onda sonora incide sobre una superficie idealmente lisa. Las dimensiones de la superficie reflectora deben ser grandes comparadas con la longitud de onda del rayo incidente. Debe de ser una superficie lisa y poco absorbente. Un ejemplo mostrado en la Figura 1, donde:

- La onda incidente, la normal a la superficie reflectoras y la onda reflejada se encuentran en el mismo plano respecto a la superficie de reflexión en el punto de incidencia.
- El ángulo que se forma entre el rayo incidente y la normal es igual a aquel formado entre la normal y el rayo reflejado.

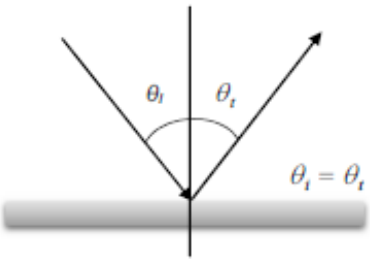


Figura 1. Reflexiones especulares

Reflexión difusa

Si la superficie reflectora no es una superficie lisa, sino que presenta irregularidades de dimensiones similares a la longitud de onda incidente, mostrada en la Figura 2, la reflexión producida tendrá lugar en múltiples direcciones, produciéndose la difusión del sonido y repartiéndose la energía en diversas direcciones de manera uniforme [1]

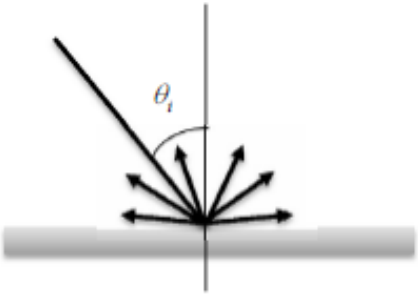


Figura 2. Difusión del sonido

2.1.4 Difracción

Es el fenómeno físico que experimenta una onda cuando encuentra en su camino un obstáculo o una abertura de un tamaño comparable al de su longitud de onda. Su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo o abertura. [2]

Si la abertura u obstáculo es menor que su longitud de onda, el sonido seguirá propagándose, rodeando al obstáculo o atravesando la abertura, sin sufrir variación. Sin embargo, si la superficie es de tamaño comparable a la longitud de onda, se producirá una distorsión notable en la onda sonora.

Si nos referimos a un obstáculo, aparecerá una sombra acústica detrás del objeto y parte de la energía sonora será reflejada y absorbida. Si se trata de una abertura, ésta se convertirá a su vez en una fuente puntual, radiando la energía incidente en forma de ondas esféricas. [1]

2.1.5 Refracción

Es la desviación en la dirección de propagación que sufre una onda cuando pasa de un medio a otro diferente. A diferencia de lo que ocurre en el fenómeno de la reflexión, en este caso, el ángulo de refracción ya no es igual al de incidencia debido al cambio de la velocidad de propagación del sonido de un medio a otro. **[1]**

2.1.6 Sonido directo

Es el sonido emitido por la fuente, es decir, coincide con el sonido que se recibiría en espacio libre. En un punto cualquiera del recinto la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora. El nivel de presión sonora en cada punto va disminuyendo a razón de 6 dB al duplicar la distancia a la fuente ("Ley de divergencia esférica"), siempre que el frente de ondas esférico esté alejado de cualquier superficie reflectante (campo libre).

Se habla también de la onda directa o sonido directo como aquel que proviene en la línea recta desde el altavoz, aunque en algún caso no cumpla al completo la ley de divergencia. [3]

2.1.7 Sonido reflejado

Es el sonido procedente de los sucesivos choques con las superficies del recinto. La energía asociada a cada reflexión depende el camino recorrido por el rayo sonoro y del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. [4]

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto, se observan básicamente dos zonas de características diferenciadas:

- **Primeras reflexiones:** Una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo. Se suele establecer un límite temporal para la zona de las primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque este valor varía según la forma o el volumen del recinto.

  Así, por ejemplo, para una sala destinada a la palabra, los 50 primeros milisegundos serán determinantes, mientras que, para una dedicada a la audición de música, habrá que analizar los primeros 80 milisegundos. Son propias de cada punto de la sala a partir de ellas se obtiene la información necesaria para describir las condiciones acústicas de un receptor situado en esa posición. Su análisis es realizado mediante la teoría geométrica. [4]

- **Campo reverberante o reflexiones tardías:** Una segunda zona formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante. Su densidad es mayor que la de las primeras reflexiones, cuya llegada está más discretizada,

aunque el oído las integra y las percibimos como un único sonido. Su nivel sonoro es menor que el de las primeras reflexiones.

Determinan como es la reverberación de la sala, es decir, cuánto tiempo perdura el sonido en ella. Por tanto, depende fundamentalmente de las características de absorción de las superficies. También influye la forma y el volumen del recinto. Su estudio se lleva a cabo mediante la teoría estadística. [4]

La figura 3 representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicción del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).

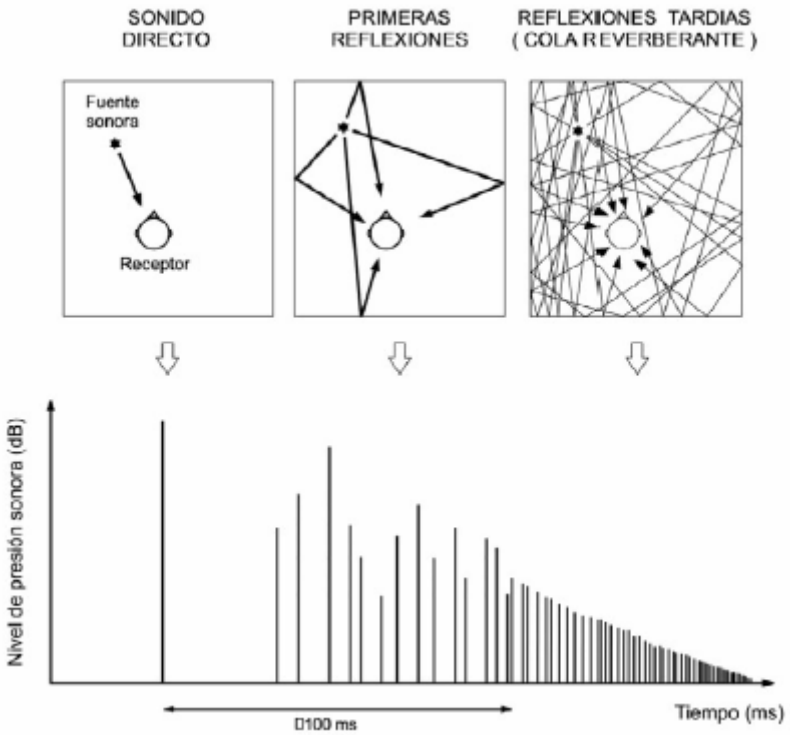


Figura 3. Ecograma asociado a un receptor. **[4]**

Existen diversas maneras de obtener esta curva de decaimiento energético. El método más sencillo consiste en obtener dicha curva emitiendo un sonido intenso y breve (impulso) y registrando la caída. Permiten obtener cantidad de información sobre las características acústicas del recinto.

2.2. Criterios de diseño: Parámetros acústicos

2.2.1 Introducción

Los recintos destinados a la transmisión de un mensaje, ya sea música o palabra, deben contar con unas características determinadas que hagan que la acústica sea adecuada.

A partir de los estudios de Sabine a finales del siglo pasado, se han desarrollado nuevas teorías tanto de la acústica de salas como de la psico acústica y de la relación entre ellas. Un gran avance surge en 1962, cuando Beranek define un conjunto de parámetros subjetivos, que permiten valorar la sala. Viveza, calidez, brillantez, difusión, sonoridad del sonido directo, sonoridad del sonido reverberante, definición o claridad, libre de eco, libre de ruido, rango dinámico, calidad tonal y uniformidad son algunos de los muchos parámetros acústicos definidos.

El tiempo de reverberación ha sido el parámetro acústico más estudiado y utilizado para la valoración de recintos, parámetro muy útil e imprescindible, pero por sí solo insuficiente para realizar una caracterización de un recinto. Mediante los parámetros acústicos objetivos es posible conocer las características acústicas de un recinto y así poder evaluar la calidad acústica de la sala.

A continuación, se van a describir los parámetros acústicos más relevantes que van a ser utilizados para la evaluación del estudio de sonido de la Escuela Politécnica. Recogidos de la Norma *UNE-EN_ISO 3382-2: 2008 "Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios* [13], con referencia a otros parámetros acústicos.

2.2.2 Nivel de presión sonora (SPL)

Es el parámetro utilizado para medir la magnitud del campo sonoro en un punto. Se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora y el valor eficaz de la presión umbral de audición a 1 kHz: [4]

$$SPL = 20\ \frac{\mathrm{Pef}}{\mathrm{Pref}}\ \text{(dB)} \qquad (3)$$

Siendo:

P_{ef} = presión eficaz del sonido en el punto considerado.

P_{ref} = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa = presión eficaz de referencia. Umbral de audición a 1 kHz.

La elección de representar el sonido en decibelios se debe a que el oído responde a los estímulos sonoros de forma logarítmica y, por otra parte, si se expresasen los sonidos audibles en pascales (Pa), la escala sería excesivamente amplia. El rango de valores de presión sonora representados abarca desde el umbral de audición 0 dB ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa) hasta el umbral del dolor 135 dB (100 Pa), siendo 1 dB el mínimo cambio perceptible.

2.2.3 Ruido de fondo. Curvas de ruido

El ruido de fondo es aquel que se percibe en una sala, cuando en ésta no se está realizando ninguna actividad. Este ruido puede producirse por el sistema de aire acondicionado, por la instalación eléctrica, o incluso puede provenir del

exterior de la sala. Más que un parámetro para valorar la calidad de la sala es un factor a minimizar para permitir la correcta escucha de la música.

Para valorar el grado de molestia que un ruido provoca, debe compararse el nivel de éste para cada banda de octava comprendida entre los 63 y 8 KHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC ("Noise Criteria"). Mostradas en la figura 4. Las curvas NC son utilizadas de forma generalizada para establecer los niveles de ruido de máximos recomendables para los diferentes tipos de recintos en función de su aplicación (oficinas, salas de conferencia, teatros, sala de conciertos, estudios de grabación, etc.). Se dice que un recinto cumple con una determinada especificación NC (por ejemplo, NC-15) cuando los niveles de ruido de donde, medidos en cada banda de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente. [4]

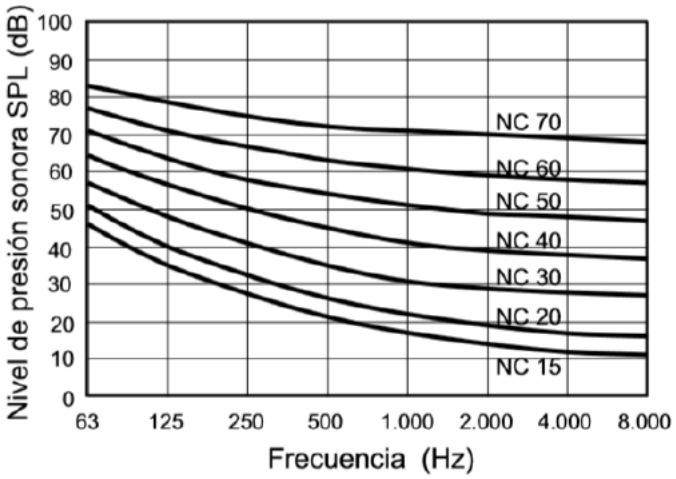


Figura 4. Curvas NC

Según se puede observar, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de sensibilidad del oído en función de la frecuencia, es decir, para una determinada curva NC, los niveles SPL máximos permitidos a bajas frecuencias (sonidos graves) son siempre más elevados que los correspondientes a frecuencias

altas (sonidos agudos), ya que el oído es menos sensible a medida que la frecuencia considerada es menor.

En la tabla 1 se muestran las curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos, junto con su equivalencia en dBA. [4]

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN DBA
ESTUDIOS DE GRABACIÓN	15	28
SALAS DE CONCIERTOS Y TEATROS	15-20	28-38
HOTELES (HABITACIÓN INDIVIDUAL)	20-30	33-42
SALAS DE CONFERENCIAS / AULAS	20-30	33-42
DESPACHOS / BIBLIOTECAS	30-35	42-46
HOTELES (VESTÍBULOS Y PASILLOS)	35-40	46-50
RESTAURANTES	35-40	46-50
SALA DE ORDENADORES	35-45	46-55
CAFETERÍAS	40-45	50-55
POLIDEPORTIVOS	40-50	50-60
TALLERES (MAQUINARIA LIGERA)	45-55	55-65
TALLERES (MAQUINARIA PESADA)	50-65	60-75

Tabla 1. Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes [4]

Finalmente, cabe mencionar que existen otros criterios de evaluación del ruido de fondo, como las curvas PNC ("Prefered Noise Criteria") y las NR ("Noise Rating"), de funcionamiento operativo análogo a las curvas NC. [4]

2.2.4 Tiempo de reverberación, TR

La reverberación se define como la persistencia del sonido en un recinto cuando la fuente que lo produce cesa de emitir súbitamente. Se define como el tiempo que transcurre desde que el foco emisor se define hasta el momento en que el nivel de presión sonora (SPL) decae 60 dB con respecto a su valor inicial. Un recinto con un TR grande se denomina “vivo”, mientras que si el TR es pequeño recibe el nombre de recinto “apagado” o “sordo”.

Normalmente, el TR varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, especialmente manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias. [4]

Para establecer un único valor recomendado de TR para un recinto dado se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 KHz. Se representa por TR_{mid}. En general, el valor más adecuando depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinado.

$$TRmid = \frac{\mathrm{TR}\ (500\ \mathrm{Hz}) + TR\ (1000\ Hz)}{2}\ (\mathrm{s}) \qquad (4)$$

En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados de TR_{mid} para las diferentes salas suponiendo que están ocupadas.

TIPO DE SALA	TRMID, SALA OCUPADA (S)
ESTUDIO DE RADIO / GRABACIÓN	0,2 - 0,4
SALA DE CONFERENCIAS	0,7 - 1,0
CINE	1 - 1,2
SALA POLIVALENTE	1,2 - 1,5
TEATRO DE ÓPERA	1,2 - 1,5
SALA DE CONCIERTOS (MÚSICA DE CÁMARA)	1,3 - 1,7
SALA DE CONCIERTOS (MÚSICA SINFÓNICA)	1,8 - 2,0
IGLESIA/CATEDRAL (ÓRGANO Y CANTO ORAL)	2,0 - 3,0

Tabla 2. Valores recomendados de TRmid en función del tipo de sala. [4]

Existe un gran número de fórmulas para calcular teóricamente el TR. La fórmula clásica por excelencia, y aceptada como de referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine. [4]

$$TR = \frac{0{,}161 \cdot \mathrm{V}}{\mathrm{Atot} + 4\mathrm{mV}} \text{ (s)} \qquad (5)$$

Donde:

V = volumen del recinto (m^3)

A_{tot} = absorción total del recinto (m^2)

m = constante de atenuación del aire (m^3)

La absorción de un material, A, se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción, α, ecuación (1), por su superficie, S. Por lo tanto, la

absorción total, A_{tot}, es la suma de todas y cada una de las absorciones individuales de las distintas superficies recubiertas por los diversos materiales: [4]

$$A_{\mathrm{tot}} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{\mathrm{i}} \cdot S_{\mathrm{i}} \qquad (6)$$

Donde:

n = número de superficies i.

α_i = coeficiente de absorción para cada superficie i.

S_i = Valor de cada superficie i, (m^2).

Partiendo de esta expresión, es posible definir el coeficiente medio de absorción como:

$$\alpha = \frac{A_{\mathrm{tot}}}{S_{\mathrm{t}}} \qquad (7)$$

Donde:

$S_t = S_1 + S_2 + S_3 + \ldots + S_n$. Superficie total del recinto (paredes, techo y suelo).

El tiempo de reverberación puede expresarse como:

$$TR = \frac{0{,}161 \cdot \mathrm{V}}{\alpha \cdot S_{\mathrm{t}} + 4\mathrm{mV}} \qquad (8)$$

En definitiva, el tiempo de reverberación depende del volumen del recinto, de la absorción de los materiales y del aire. Así, cuanto mayor sea la absorción, menor será el TR y cuanto mayor sea el volumen tenga la sala, mayor será.

También podemos calcular el TR mediante fórmulas basadas en la teoría estadística (Eyring-Norris, Arau-Puchades, Kuttruff,etc).

Debido al ruido de fondo en muchas ocasiones no es posible medir una caída de 60 dB. Por ello se definen otros parámetros como el T_{30} o T_{20}.

El T_{20} es el tiempo que tarda el nivel de presión acústica en caer 20 dB. Se obtiene midiendo el tiempo que transcurre desde que la curva decae de -5 dB hasta -25 dB respecto al nivel inicial y multiplicando este valor por 3.

El T_{30} es el tiempo que transcurre desde que decae de -5 dB hasta -35 dB respecto del nivel inicial y multiplicando por 2. [4]

2.2.5 Early Decay Time, EDT

Este parámetro, también mide, como el TR, la velocidad de caída, pero evaluándola a partir de la caída inicial, el intervalo entre 0 dB y -10 dB. Se define como el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora decae 10 dB, multiplicado por 6. Al igual que en el caso del TR, el EDT varía en función de la frecuencia. [4]

$$EDT = 6 \cdot (t_{-10})$$

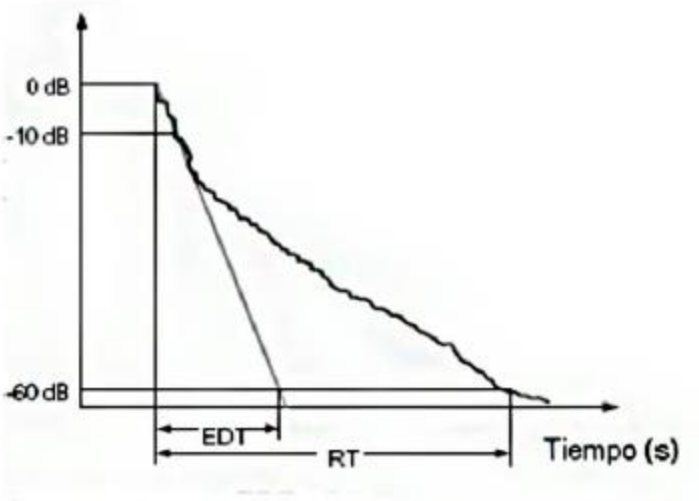


Figura 5. EDT

El EDT está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza que el TR utilizado tradicionalmente. Esto significa que, en todos aquellos puntos de una sala con un EDT significativamente menor que el RT, la sala resultará, a nivel subjetivo, más apagada de lo que se deduciría del valor de TR.

Normalmente, habrá puntos que posean una doble pendiente en la curva energía -tiempo y en ellos los valores de EDT y TR diferirán. También la curva puede presentar una doble pendiente cuando el punto en consideración pertenece a una zona del recinto de características acústicas sensiblemente diferentes a las del resto.

Así, por ejemplo, se tendrán valores de EDT menores en aquellos puntos que presentan una mayor concentración de las reflexiones o también con una mayor absorción respecto al resto de posiciones de la sala.

Con objeto de garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, es preciso que el valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz sea del mismo orden que TR_{mid}. [4]

2.2.6 Relaciones Energéticas

Con el fin de estudiar las características del sonido reflejado en una sala, así como su relación con el sonido directo, se utilizan una serie de parámetros que expresan relaciones energéticas y que dependen del tiempo.

- **C_t** = es la relación entre la energía recibida hasta el instante t, incluyendo el sonido directo, y la energía que llega después del instante t. Se expresa en escala logarítmica y para la música se suele utilizar el valor medio de los correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz.

$$C_t = \frac{\text{Energía hasta el instante t}}{\text{Energía a partir del instante t}} \text{(en dB)} \qquad (9)$$

$$C_t = 10\log\frac{\int_0^t p^2(t)dt}{\int_t^\infty p^2(t)dt} \text{(en dB)} \qquad (10)$$

Donde:

p (t) = presión sonora instantánea.

2.2.6.1 Claridad de la voz, C_{50}

El parámetro C_{50} define la inteligibilidad de la palabra y de la música cantada. Se define como la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (este incluido) y la que llega después de los primeros 50 ms. Es el valor de C_t, particularizado para t = 50 ms. Se calcula en cada banda de frecuencia entre 125 Hz y 4 kHz. [4]

$$C_{50} = 10\log\frac{\int_{0}^{0,005} p^2(t)dt}{\int_{0,005}^{\infty} p^2(t)dt} \text{ (en dB)} \qquad (11)$$

Según L.G.Marshall [4], para caracterizar una sala con un único valor, es suficiente utilizar el denominado *Speech Average*, que se calcula a partir de C_{50}.

$$C_{50}\text{ (speech average)} = 0{,}15\cdot C_{50}\text{ (500 Hz)} + 0{,}25\cdot C_{50}\text{ (1000Hz)} + 0{,}35\cdot C_{50}\text{ (2000Hz)} + 0{,}25\cdot C_{50}\text{ (4000Hz) (en dB)} \qquad (12)$$

Las constantes que aparecen en esta ecuación fueron deducidas de la proporción en la que influyen las distintas bandas de frecuencia en la inteligibilidad de la palabra.

Para una aceptable inteligibilidad, deberá cumplirse la siguiente condición:

$$C_{50}\text{ (speech average)} \geq 2\text{ dB}$$

Cuanto más se supere el límite, mejor será la sonoridad y la inteligibilidad de la palabra en el punto considerado. [4]

Figura 6. Valoración de la inteligibilidad en función del C_{50} (sala ocupada) [5]

2.2.6.2 Claridad musical, C_{80}

El parámetro C_{80} se utiliza para valorar el grado de separación que se puede apreciar entre los distintos sonidos de una composición musical y se define como el cociente entre la energía sonora recibida durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (éste incluido) y la energía que llega después de los 80 ms. Se calcula en cada banda de frecuencia entre 125 Hz y 4 kHz. [4]

$$C_{80} = 10\log\frac{\int_{0}^{0,08} p^2(t)dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t)dt} \text{ (en dB)} \qquad (13)$$

La elección del intervalo temporal 80 ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de ese intervalo son integradas por el oído justo con el sonido directo y esto hace que aumente la claridad musical. Como valor representativo se utiliza *el Music average*, que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_{80}\,(\text{Music Average}) = \frac{C_{80}(500\,Hz) + C_{80}(1000\,Hz) + C_{80}(2000\,Hz)}{3}\ \ (\text{en dB})$$

Finalmente, mencionar que tanto el parámetro C_{50} como el C_{80} no son estadísticamente independientes, sino que varían con el tiempo de reverberación, disminuyendo a medida que éste aumenta.

Para instrumentos electrónicos Marshall recomienda un valor entre 6 y 14 dB para sala ocupada o entre 4 y 12 dB para sala vacía. [5]

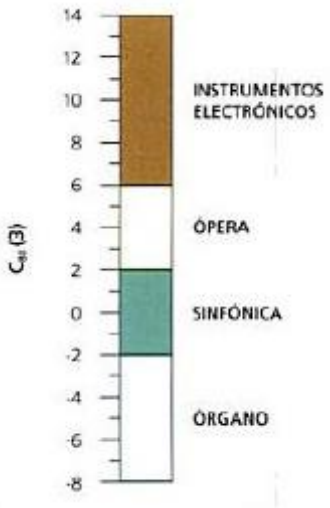


Figura 7. Valores de C_{80} recomendados por Marshall (sala ocupada).

2.2.7 Definición, D_{50}

La definición D_{50}, se define como la relación entre la energía que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida. [4]

$$D = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \qquad (15)$$

Un recinto con un índice de definición pequeño se percibe como poco íntimo, y normalmente ello produce un exceso de tiempo de reverberación, es decir, que la sala sea demasiado viva.

En las salas dedicadas a la música, en la zona de frecuencias centrales de 5000 Hz y 1000 Hz, se debe presentar un índice de definición del 50 %. Si la definición del sonido incrementa, ello quiere decir que la sala se halla mejor preparada para la expresión hablada, pero no para la musical.

2.2.8 Tiempo central, Ts

Según Kürer, T_s se define como el momento de primer orden del área situada por debajo de la curva de decaimiento energético:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t\, p^2(t)dt}{\int_{0,005}^{\infty} p^2(t)dt} \text{ (en ms)} \qquad (16)$$

Es un valor indicativo de la "distancia" (en ms) desde el origen temporal t = 0 hasta el "centro de gravedad" del área de la curva de decaimiento. Sirve para medir el grado de nitidez del sonido. Se recomienda un T_s < 140 ms. [4]

2.2.9 Sonoridad

Hay dos parámetros que se denominan sonoridad: Speech Sound Level, S, utilizado en recintos para la palabra y fuerza acústica, G, que se utiliza para las salas de concierto.

2.2.9.1 Sonoridad, G

Según Lehmann, la sonoridad G (*Strenght factor*) se define como la diferencia del nivel de presión sonora, L_p, producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m (nivel de referencia).

Ambos niveles se miden por bandas de frecuencia de octavas desde 125 Hz a 4 kHz y aplicando la misma potencia a la fuente sonora. El nivel de referencia en cada banda de frecuencias es de 69 dB SPL. [4]

$$G_{receptor} = SPL_{receptor} - SPL_{(10m)\ espacio\ libre} \text{ (en dB)} \qquad (17)$$

Usualmente, se recurre al valor G_{mid} para evaluar la calidad acústica de la sala. Éste se calcula como la media aritmética de G en las bandas de octava centradas en las frecuencias de 500 y 1000 Hz, cuando la sala está vacía. [4]

2.2.9.2 Sonoridad, S

Según Barron, la sonoridad (*Speech sound level*) en un punto de una sala se define como la diferencia entre el nivel medio de presión sonora existente en el mismo producido por un actor situado sobre el escenario y le nivel de referencia de 39 dB. Este valor corresponde al nivel medio (promediado en el espacio) que produciría dicha persona al aire libre, a una distancia de 10 m.

$$S = SPL_{receptor} - 39 \text{ (dB)} \qquad (18)$$

Ambos niveles medios se obtienen promediando los valores correspondientes a las bandas de frecuencias centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. [4]

Para ambos parámetros, G y S, los principales factores que influyen en su medida son:

- La distancia del receptor a la fuente: disminuyen, al aumentar dicha distancia.
- El área ocupada por el público: disminuyen, al aumentar la absorción debida al público.

- El nivel de sonido reverberante: aumentan, al aumentar la contribución energética debida a la reverberación, aunque empeora la inteligibilidad.
- Las primeras reflexiones: aumentan, cuando aumenta el número de primeras reflexiones, que a su vez aumentan la inteligibilidad.

2.2.10 Criterios de inteligibilidad

La inteligibilidad de una sonorización de un recinto es un hecho subjetivo. A pesar de ello se sabe de qué factores acústicos depende y se puede objetivar en cierta manera.

La inteligibilidad depende de una serie de factores:

Factores controlables:

- Nivel de presión sonora
- Relación SNR
- Tiempo de reverberación
- Respuesta temporal (ecos y retardos)
- Respuesta en frecuencia
- Distorsión

Factores no controlables:

- Dirección del orador
- Agudeza auditiva de la audiencia

A continuación, se describen los parámetros que se van a usar en este trabajo para valorar la inteligibilidad en el estudio de sonido.

2.2.10.1 Índice de transmisión de la palabra, STI

STI significa *Speech Transmission Index* y fue definido por Houtgast y Steeneken en la primera mitad de la década de los 70. Puede tomar valores comprendidos entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). El índice de transmisión del habla o STI evalúa las pérdidas de inteligibilidad a partir del análisis de la propia señal vocal, midiendo su degradación. [6]

Su cálculo es muy complejo y laborioso. Está basado en la función de transferencia de modulación, MTF, el cual considera el recinto como un sistema de transmisión acústico con una señal de entrada y una señal de salida. La sala provoca modificaciones sobre la señal original debidas a la reverberación y al ruido de fondo. La valoración para el STI se muestra en la siguiente tabla:

STI	***Calificación***
0 – 0,3	Mala
0,3 – 0,45	Pobre
0,45 – 0,6	Aceptable
0,6 – 0,75	Buena
0,75 – 1	Excelente

Tabla 3. Valoración de la inteligibilidad de una sala en función del STI. [6]

2.2.10.2 RASTI o STI rápido

RASTI son las siglas de “Rapid Transmission Index”. Surge como la simplificación del parámetro STI para reducir así el tiempo de cálculo.

El índice STI necesita demasiados coeficientes para su cálculo. El RASTI es una simplificación del STI, usando menos frecuencias de modulación y menos frecuencias de moduladora. En total son 5 moduladoras para 2 kHz y 4 moduladoras para 500 Hz.

La expresión final de RASTI coincide con la de STI, cambiando el valor de la relación señal-ruido aparente media global. [6]

3. CONOCIMIENTOS PREVIOS DE DISEÑO

3.1 Aislamiento acústico

A continuación, se desarrollan los conocimientos adquiridos del libro *"Manual de construcción de estudios de sonido, salas de grabación y control"* [7].

Evidentemente un nivel bajo de ruido es un objetivo importante para una habitación acústicamente sensible, y que requiere un esfuerzo considerable para lograr. Cualquier ruido que pasa a través de barreras de aislamiento se registra junto con la señal deseada. Del mismo modo, el ruido puede interrumpir una sesión de escucha.

Nuestro objetivo debe ser reducir todos los ruidos ambientales y electrónicos a un mínimo práctico absoluto. ¿Cuán bajo debe ser el nivel de ruido dentro de un espacio acústicamente sensible? También podemos preguntar, si los estándares de ruido disminuyen, ¿Cuál serían las consecuencias? Las respuestas dependen de cuán crítica será la grabación y la escucha. Una especificación para un nivel bajo de ruido interior puede ser difícil y costoso de lograr. Las respuestas a las preguntas también están muy influenciadas por el presupuesto. La selección del lugar es sumamente importante para determinar la calidad acústica del espacio interior.

3.1.1 Fugas de sonido y flanqueo

La energía del sonido viaja fácilmente a través del aire. Cuando se diseña y construye una partición de aislamiento acústico, es muy importante asegurarse de que la partición sea hermética. Cualquier apertura en la partición, por pequeña que sea, permitirá que el sonido viaje fácilmente a través de la partición. Visto de otra manera, una fuga de aire tiene un TL de 0 dB. Una abertura de solo 0.01% en la superficie de una partición puede reducir la pérdida de transmisión general de la pared en 10 dB o más. La necesidad más importante de aislamiento acústico, y cuanto mayor es la TL prevista de la partición, mayor es el daño relativo causado por una fuga de sonido.

En la práctica, esto significa que se debe tener cuidado durante la construcción y sellar todos los agujeros y grietas y cualquier otra fuga de aire potencial. De lo contrario, las propiedades de aislamiento de incluso las particiones más pesadas se verán comprometidas. Los absorbentes porosos, como la fibra de vidrio, no deben usarse para tapar las fugas, la masilla flexible no endurecida es una buena solución. Deben evitarse todas las posibles aperturas, por ejemplo, la partición de tablero de yeso debe ser calafateados. Además, el perímetro de las puertas debe ser perfectamente selladas y se deben evitar las aberturas como en las puertas con persianas.

Al construir paredes, las salidas de corriente alternan u otras cajas de servicio no deben colocarse hacia atrás en lados opuestos de una pared, cualquier abertura en las cajas debe sellarse. Conectando el conducto también debe estar sellado internamente. El montaje del accesorio, malo y bueno, se muestra en Figura 12. Cuando sea posible, para ayudar a evitar fugas de sonido, los accesorios deben montarse en la superficie de la pared en lugar de usar un montaje en la pared.

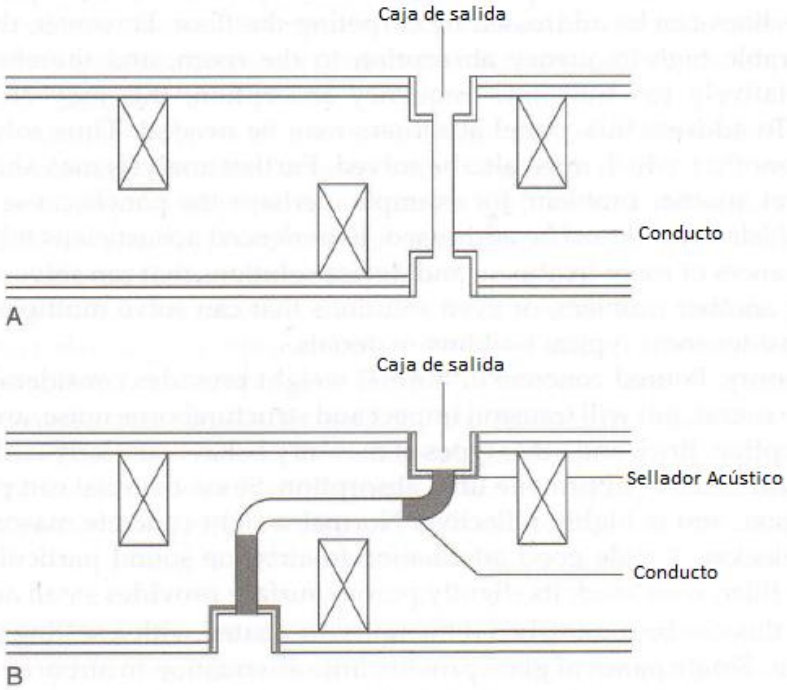


Figura 12. Esquema de cómo deberían ser montadas las cajas de salida para conservar el aislamiento de una pared. (A) Cajas de salida son montadas opuestas, sin sellado acústico y los conductos no están sellados. (B) Las cajas de salida están espaciadas, se usa sellador acústico y los conductos están sellados. Esta construcción ayuda a mantener el aislamiento acústico. [7]

El flanqueo ocurre cuando los conductos encuentran un camino alrededor de una barrera. Por ejemplo, el área abierta por encima de las paredes que no alcanzan el techo estructural. Claramente, esta brecha plantea un problema. El sonido puede pasar fácilmente de una sala a otra a través del espacio abierto. Cualquier espacio por encima de las paredes debe estar sellado. Del mismo modo, cualquier conducto que pasa entre habitaciones debe estar aislado. De lo contrario, incluso si no hay respiraderos en las habitaciones, el sonido ingresará a los conductos en una habitación ruidosa y viajará fácilmente a través del conducto hacia otras habitaciones. Para evitar esto, los conductos en la habitación ruidosa deben estar aislados, por ejemplo, en túneles de paneles de yeso. Cuando los

respiraderos están presentes en los conductos, deflectores o más elaborados se deben tomar medidas.

3.1.2 Materiales de construcción

3.1.2.1 Hormigón

El hormigón vertido de peso normal proporciona una atenuación considerable al sonido aerotransportado, pero transmitirá impacto y ruido transmitido por la estructura, y apenas proporciona absorción. El ladrillo y otros tipos de mampostería se comportan de manera similar con un alto nivel de atenuación del sonido aerotransportado, pero proporcionan poca absorción. El material de piedra puede proporcionar atenuación significativa, y es altamente reflexivo. Unidades de mampostería de hormigón de peso normal (como bloques de hormigón) proporcionan una buena atenuación al sonido en el aire, especialmente si los huecos están llenos de arena, su superficie ligeramente porosa proporciona pequeñas cantidades de absorción, pero esto puede verse disminuido si las unidades están cubiertas con una pintura de sellado.

3.1.2.2 Vidrio

Los paneles individuales de vidrio proporcionan poca atenuación al sonido aéreo. El vidrio apenas proporciona absorción a altas frecuencias, pero puede actuar como un resonador y proporcionar absorción a frecuencias más bajas. Algunos tipos de vidrio laminado proporcionan un aumento de atenuación del sonido en comparación con el vidrio laminar del mismo espesor.

3.1.2.3 Panel de yeso

El panel de yeso es un material ligero, pero puede proporcionar una cantidad razonable de atenuación, especialmente cuando se utilizan varias capas y bien selladas. El panel de yeso no proporciona absorción a altas frecuencias, pero cuando se usa con espacio aéreo, puede actuar como un resonador y proporcionar una absorción de baja frecuencia. Los perfiles de sustentación de acero utilizados para atornillar particiones ofrecen una elasticidad leve y, por lo tanto, desacoplan las diferentes partes de la partición y mejora la atenuación. Pernos de acero pesados y montantes de madera ofrecen menos elasticidad, y, por lo tanto, menos desacoplamiento y menos atenuación. La atenuación puede mejorarse agregando absorción porosa en la cavidad interior y mediante el uso de canales elásticos.

3.1.2.4 Madera contrachapada

La madera contrachapada no proporciona atenuación significativa, y ofrece poca absorción a altas frecuencias; cuando se usa como resonador, puede proporcionar absorción de baja frecuencia. Al igual que en la madera contrachapada, los paneles de madera en listones agregan poca atenuación a la pared, pero pueden absorber una considerable cantidad de energía de baja frecuencia.

3.1.2.5 Revestimiento para el suelo

La alfombra puede ser efectiva para tratar ruido tanto en el aire como en la estructura. La alfombra proporciona una buena absorción de sonido a frecuencias más altas, es uno de los pocos revestimientos de suelo para hacer esto. En la mayoría de las habitaciones alfombradas, la alfombra proporciona la mayoría de la absorción de alta frecuencia. La absorción mejora cuando la alfombra es gruesa y se coloca sobre relleno poroso. La alfombra también es extremadamente útil para atenuar ruido de impacto de alta frecuencia en suelos de hormigón; sin embargo, en suelos de madera, el ruido de impacto de baja frecuencia puede seguir siendo problemático. La desventaja de la alfombra es que, si bien absorbe de manera eficiente altas frecuencias, no absorbe casi bajas frecuencias. Una habitación con alfombras extensas probablemente requerirá absorbentes de baja frecuencia para proporcionar un sonido balanceado, de lo contrario, la habitación puede tener un sonido de graves muy pesado. Loseta resistente (como vinilo) proporciona poca atenuación o absorción, sin embargo, puede disminuir los sonidos de impacto amortiguando el impacto.

3.1.2.6 Cortinas

Cortinas pesadas pueden proporcionar absorción, mientras que las cortinas más delgadas son mucho menos eficaces. Las cortinas deben cubrirse con pliegues profundos y no se debe aplicar directamente a la superficie de la pared. Acústicamente las cortinas transparentes y otros materiales pueden actuar como revestimientos porosos para fibra de vidrio u otros paneles absorbentes.

3.1.2.7 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es ampliamente utilizada como aislante de calor y aislamiento térmico de materiales de bajo costo, es un absorbente de sonido eficiente. La fibra de vidrio está disponible en tablas, mantas y bloques, también se usa para soporte elástico como bloques y hojas comprimidas. En general, cuanto más grueso es el material de fibra de vidrio, mayor es la absorción. La absorción de alta frecuencia es bastante alta, la fibra de vidrio puede proporcionar atenuación adicional cuando se coloca dentro de una partición tal como una pared de perfiles sustentados.

3.1.2.8 Productos especializados

Existe una gran variedad de productos de construcción especializados, están diseñados para proporcionar características acústicas específicas. Espuma acústica (como poliuretano) fabricado con una estructura de célula abierta proporciona un aislamiento acústico pobre, pero buena absorción. La absorción aumenta con el espesor de la espuma y el espacio aéreo detrás la espuma. Un enlucido de yeso común tiene características de atenuación y absorción similares al panel de yeso. El yeso acústico es más poroso que el yeso común y proporciona una buena cantidad de absorción. Existen varios tipos de yeso acústico disponibles en el mercado. Las láminas de vinilo con plomo proporcionan un alto grado de atenuación, porque gracias a su flexibilidad, la hoja de plomo se puede usar para sellar brechas en espacios irregulares como en conductos. El revestimiento del conducto, generalmente de fibra de vidrio, proporciona una buena absorción y atenuación del ruido a lo largo de la longitud del conducto interior. La atenuación es mejor en las frecuencias medias y altas. Muchos tipos de compuestos no endurecedores se usan para sellar grietas, uniones y penetraciones en paredes, un sello hermético es crítico para evitar fugas de sonido, que alteran las propiedades de atenuación de una

partición. Los aerosoles de fibra mineral o de celulosa se usan para aplicaciones térmicas aislamiento e ignífugos cuando se aplica con una capa gruesa, pueden proporcionar absorción.

3.1.3 Construcción de paredes

En salas donde se necesita cierta sensibilidad acústica, las paredes adquieren una importancia adicional. Por lo general un buen aislamiento acústico es más difícil de lograr a frecuencias bajas que a frecuencias altas.

El sonido se propaga por cualquier medio, transmitido por el aire hasta por sólidos (estructuras), viaja con más eficacia en medios más densos. El sonido en el aire es mayor en frecuencia, más de 100 Hz y en estructuras por debajo de los 100 Hz. La estructura suele transmitir ese sonido de baja frecuencia como una vibración que se puede reducir desacoplando elementos de la partición y por tanto romper la ruta de transmisión.

Como por ejemplo dos hojas separadas por soportes resistentes a la flexión eliminarán cualquier condición de resonancia en el rango frecuencial de transmisión por lo que reducirá el sonido transmitido.

La pérdida de transmisión de la energía del sonido a través de una pared depende de la densidad del material y la frecuencia.

Se debe tener claro que la fibra de vidrio no aumenta la pérdida de transmisión directamente, ayuda a reducir las resonancias agregando amortiguación a la estructura. La estructura lleva el sonido de un punto a otro

haciendo vibrar paredes y suelo, realzando el sonido en el aire dentro de las habitaciones. Por lo tanto, la protección del sonido transmitido por la estructura como por el aire deberán ser considerados.

La construcción de una pared con soportes y placas de yeso puede proporcionar un aislamiento de sonido suficientemente bueno, mejorando con el uso de capas dobles de placas de yeso. Los soportes metálicos debido a su capacidad de flexión proporcionan un buen aislamiento de sonido en comparación con los soportes de madera, el aislamiento se mejora cuando las placas de yeso son atornilladas a los soportes metálicos en lugar de utilizar adhesivo. Una solución para evitar vibraciones de las placas de yeso en los soportes de metal es añadir mayor cantidad de tornillos y una línea de masilla a lo largo del soporte. Sin olvidar el sellado para evitar las fugas acústicas y flanqueos del sonido.

Las paredes de hormigón y ladrillo proporcionan un aislamiento efectivo. Son materiales pesados donde favorece la ley de masas mejorando el aislamiento de las paredes ligeras en frecuencias bajas, por lo tanto, más recomendables para estudios de sonido. El aislamiento puede ser mejorado añadiendo arena compactada o mortero en las celdas de los bloques de hormigón, incluso agregando una placa de yeso o construyendo una partición doble de bloques de hormigón con espacio de aire para colocar fibra de vidrio y aumentar el aislamiento. El inconveniente de las paredes de mampostería es que son altos transmisores de ruido impulsivo, por lo tanto, se debe tener cuidado a la hora de aislar estas fuentes de ruido impulsivo.

3.1.4 Construcción de suelos y techos

En la construcción de un suelo o techo se deberán tener en cuenta varios factores como en la construcción de paredes. Deben proporcionar suficiente aislamiento entre habitaciones situadas encima o debajo de la habitación a diseñar. A diferencia de los diseños de paredes es la importancia de la direccionalidad de la fuente de ruido, ya que es más difícil aislar ruido proveniente de un piso superior debido al sonido de las pisadas. El sonido penetra en el piso inferior provocando ruidos molestos limitando la privacidad en las viviendas y los espacios sensibles al sonido como estudios de grabación. Este ruido de impacto da lugar a vibraciones de la estructura del techo que se transmiten a puertas, armarios y todo objeto con capacidad de vibrar en la sala inferior. El diseño de suelos flotantes o alfombrado disminuye la transmisión de ruido de impactos en alta frecuencia, pero no existen diseños estructurales ligeros económicamente prácticos que eviten la transmisión del ruido por impactos. Aunque el suelo y techo sean propensos al ruido de impactos, también el ruido de impacto puede transmitirse a través de elementos estructurales a habitaciones adyacentes. Debe ser tratado desde la fuente.

Al igual que para clasificar el rendimiento de las diferentes estructuras de paredes mediante los índices R_w (dB), para estructuras de suelo y techo existen clasificaciones de clases de aislamiento a impactos o vibraciones L_w (dB). Es una calificación del rendimiento de sonido de impacto de construcciones de suelo y techo. Cuanto menor sea la calificación L_w, más efectiva será la construcción reduciendo la transmisión de sonidos de impacto, medidos en tercios de octava en la banda de frecuencia. Hay que tener en cuenta que no obtiene valores inferiores a 50 Hz por lo que una calificación alta de L_w puede transmitir considerable ruido de baja frecuencia.

Otra calificación de aislamiento a impactos, IIC, es descrita en la norma *ASTM, Estándar E989-89, Clasificación Estándar para determinar la clase de aislamiento de impacto.*

La mejor forma de comprenderlo es representando gráficamente el rendimiento de pérdida de transmisión de, por ejemplo, tres construcciones de suelos/techos, mostrados en la figura 13. La primera estructura (A) formada por vigas sujetando en el borde inferior el techo de panel de yeso, en la parte superior un subsuelo de madera contrachapada y un suelo de parqué, en la segunda (B) se produce una mejora introduciendo fibra de vidrio y en la tercera estructura (C) agregando en el techo varias capas de placa de yeso con unas tiras de soportes resistentes entre las vigas y la placa de yeso para evitar vibraciones.

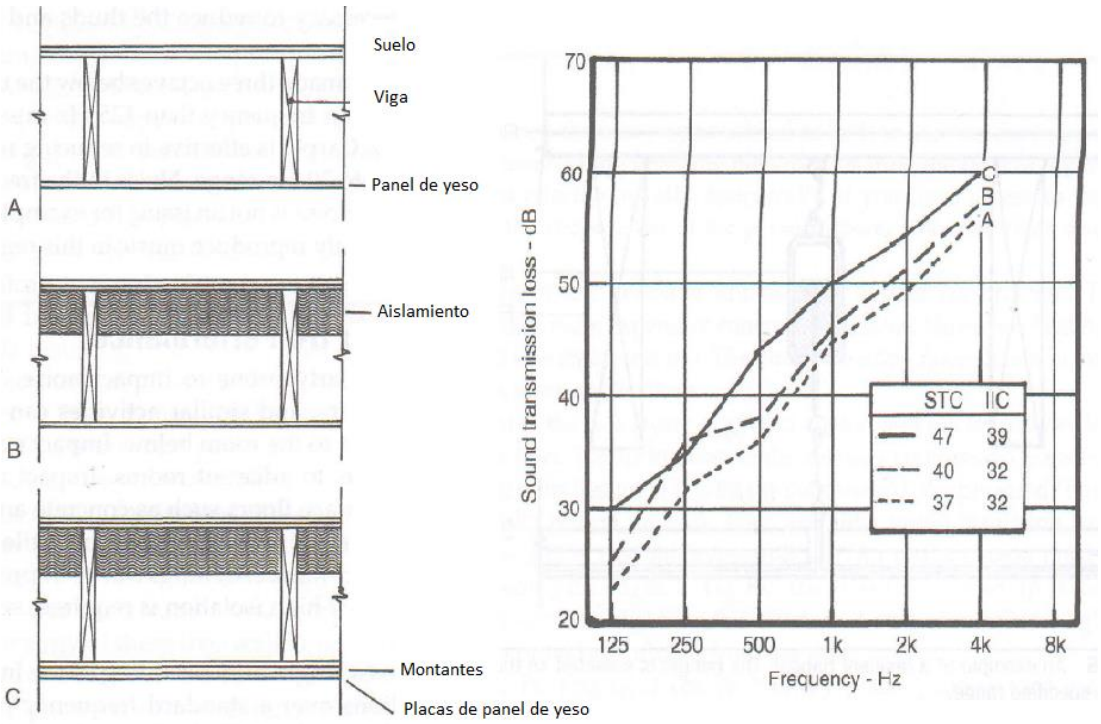


Figura 13. Construcción de tres estructuras comunes de suelo/techo y comparación de la pérdida de transmisión. [7]

Las curvas son suaves por lo que no tienen efectos de resonancia muy negativos. Agregando a la estructura (A) con STC-37 fibra de vidrio (B) gana solo 3 dB produciendo STC-40. Con la mejora del techo (C) proporciona una ganancia de 7 dB, STC-47. Un total de 10 dB con la adición de fibra de vidrio y canales resistentes está cerca de la mejora máxima que se puede esperar. Respecto a la calificación IIC se puede decir que la fibra de vidrio, como ya se ha dicho, no aumenta el aislamiento del ruido de impactos, consiguiendo una calificación IIC-32 en las dos primeras estructuras, sin embargo, la mejora en el techo con los soportes resistentes y varias capas de panel de yeso si conlleva un aumento de esta calificación de hasta 7dB, con una calificación de IIC-39.

Una forma muy eficaz para reducir el ruido de impactos del piso de arriba de un edificio ya construido, es tratar el suelo de donde proviene la fuente de ruido instalando un suelo flotante. Un ejemplo de construcción se muestra en la figura 14, donde el peso de las capas de panel de yeso y el acabado de madera contrachapada es respaldado por una capa de fibra de vidrio. La elasticidad de la fibra de vidrio comprimida es esencial para el diseño del suelo flotante. Para aumentar el aislamiento, los paneles de yeso y acabado del suelo no deben tocar la estructura por lo que es importante levantar la fibra de vidrio en los bordes para aislarlos de la estructura.

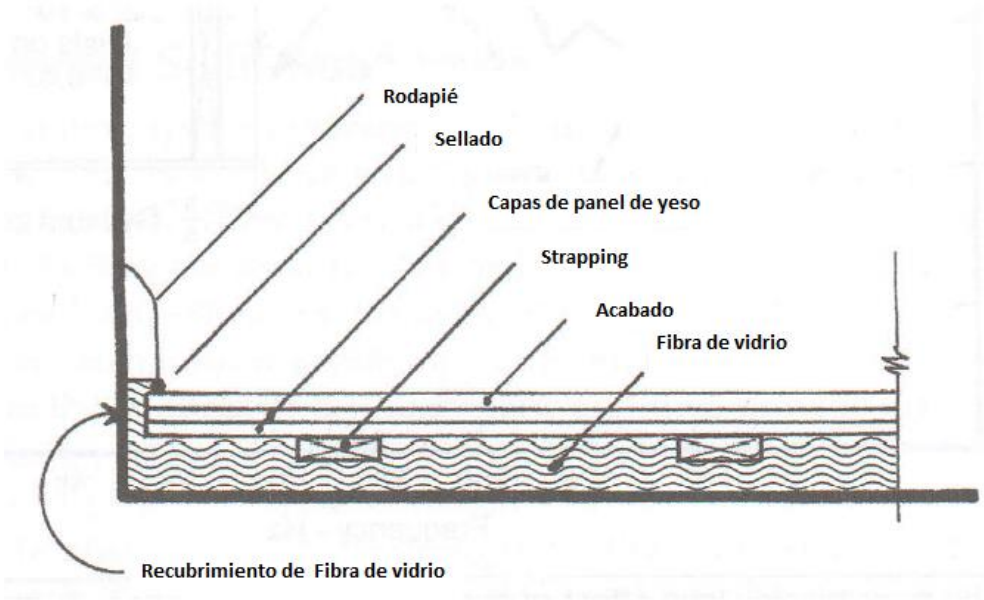


Figura 14. Construcción de bajo coste para suelos flotantes de madera. [7]

3.1.5 Construcción de ventanas y puertas

Las ventanas ofrecen visualización entre las diferentes salas en un estudio de sonido, por ejemplo, un técnico de sonido en la sala de control debe saber que están haciendo los músicos en la sala de grabación. Para obtener un aislamiento acústico adecuado se utilizan múltiples capas de paneles de vidrio gruesos prestando máxima atención en su construcción para evitar las fugas de sonido. Las ventanas de doble panel o doble acristalamiento separados por un espacio aéreo proporcionan aproximadamente 30 dB de pérdida de transmisión.

En la construcción de una ventana de observación para una pared doble, mostrada en la figura 15, el marco de la ventana se construye en dos mitades, cada una asegurada a un lado de la pared sin conexión física con el otro marco, evitando acoplamientos de las paredes, irán sellados por tiras de espuma. Los dos paneles de vidrio de diferentes espesores montados sobre tiras elásticas. El espacio interior

cubierto por absorbente de fibra de vidrio o espuma y los topes externos atornillados al marco para poder quitar los cristales.

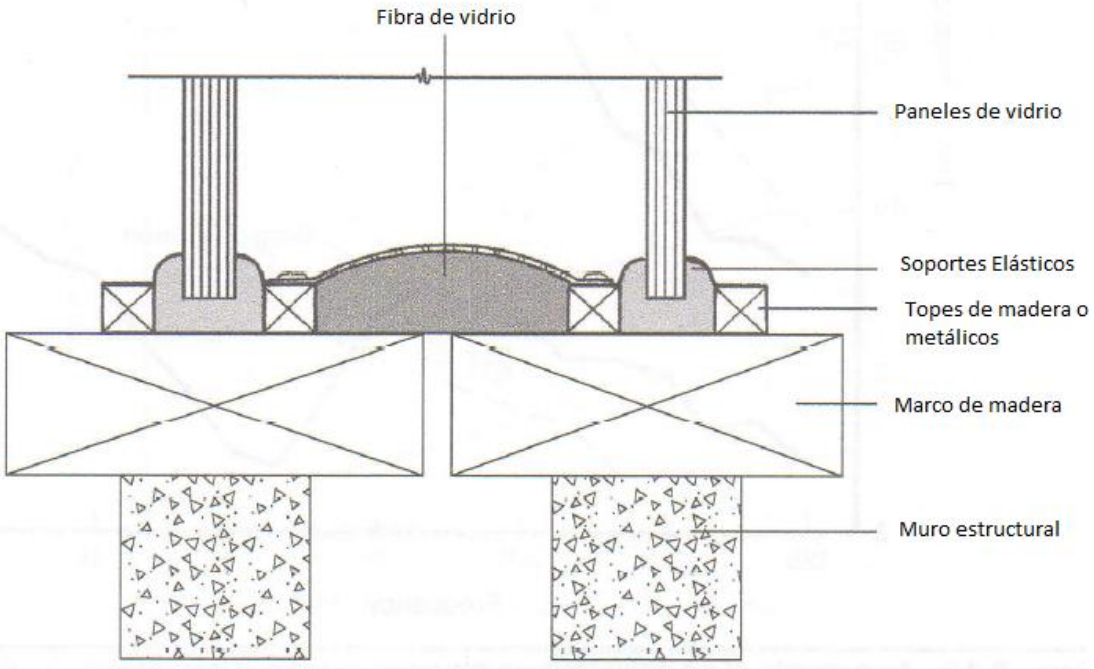


Figura 15. Detalles de un ejemplo de construcción de una ventana de observación. [7]

Una teoría experimentada por **Sabine (1975)**, mostrada en la siguiente figura, en la que demuestra que dos ventanas de doble panel de vidrio de diferentes espesores tienen pérdidas de transmisión muy similares en la región de 1 a 3 kHz, pero cuanto mayor es el espesor del panel, mayor pérdida de transmisión por debajo de 1 kHz.

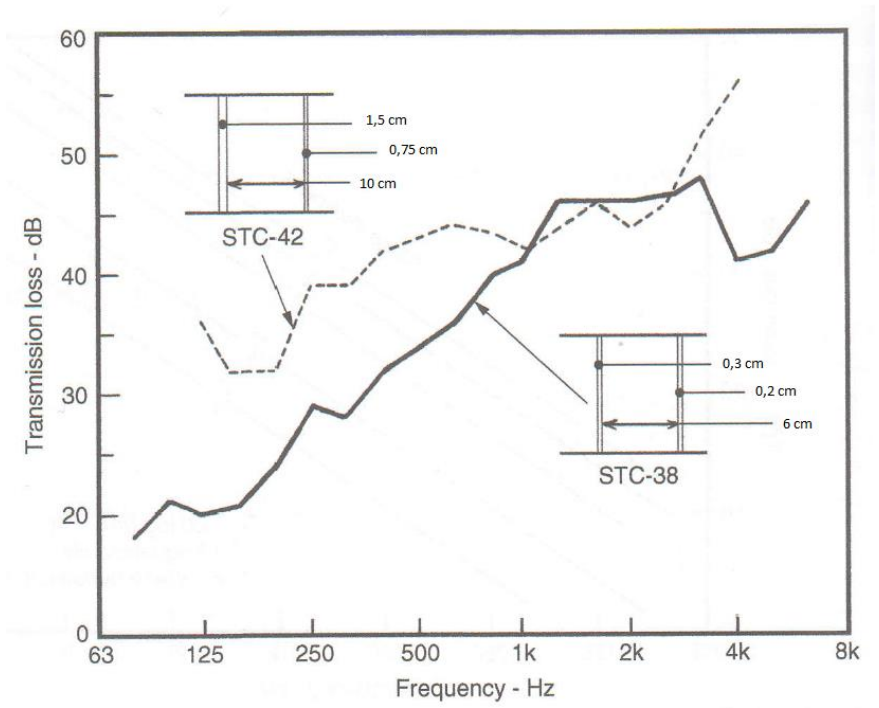


Figura 16. Comparación de la pérdida de transmisión en dos ventanas de doble panel. Línea continua: panel de 0.3 y 0.2 cm. Línea discontinua: panel de 1.5 y 0.75 cm. *(Sabine 1975).* [7]

Quirt, en **1982**, demostró que el efecto de duplicar la masa de vidrio y espaciado entre los paneles de una ventana de doble panel también provoca aumentos de ganancia en la clasificación STC. [7]

Las irregularidades de las curvas de pérdida de transmisión medidas son provocadas por **agujeros acústicos**, es decir, atenuación del sonido en un rango de frecuencias determinado. Varios efectos son los que causan estos agujeros acústicos en la curva de pérdida de transmisión de una ventana de vidrio.

Uno de los agujeros acústicos más relevantes es la **resonancia masa-aire-masa** de una doble ventana, donde la masa del panel de vidrio en la que incide el sonido vibra lo cual provoca que el aire de la cavidad actúe como un resorte y hace que el segundo panel de vidrio vibre. Este efecto resonante suele producirse a

frecuencias bajas, demostrado por Quirt en 1982 [7] donde la frecuencia de resonancia masa-aire-masa puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$f = 170 \times \sqrt{\frac{m1+m2}{m1\times m2\times d}} \qquad (19)$$

Donde: **f** es la frecuencia de resonancia masa-aire-masa (Hz), **m1** y **m2** las densidades de superficies de los paneles de vidrio (lb/ft^2) y **d** el espaciado entre ellos (pulgadas).

También se puede hablar de agujero acústico a la **caída de coincidencia**, causada por la flexión del panel de vidrio que interactúa con el sonido que lo golpea. Cuando la frecuencia de la presión del sonido incidente coincide con la frecuencia de la vibración del panel produce una disminución de la pérdida de transmisión del sonido. Esto significa que el sonido en esta frecuencia o cerca de ella penetra más fácilmente en la ventana. La frecuencia con la que se produce este efecto de coincidencia es una ventana puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación:

$$f = \frac{500}{t} \qquad (20)$$

Donde: **f** es la frecuencia de coincidencia (Hz) y **t** el espesor del vidrio (pulgadas).

En la curva de pérdida de transmisión de sonido de una ventana de doble panel que se muestra en la siguiente figura, aparece una resonancia masa-aire-masa y una caída por coincidencia medida por (Quirt, 1982). [7]

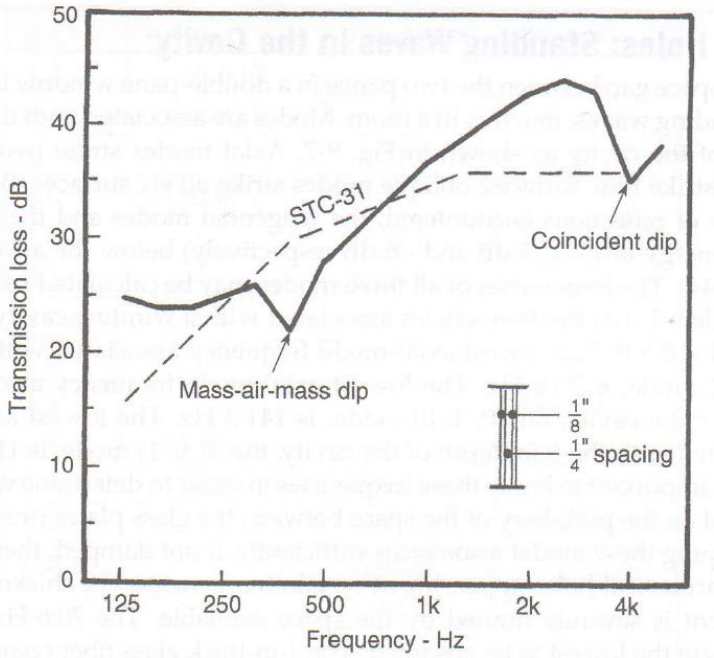


Figura 17. Comparación entre resonancia masa-aire-masa y caída de coincidencia (Quirt,1982). [7]

Cerca de 400 Hz la curva se atenúa alrededor de 5 dB debido al efecto masa-aire-masa, para demostrar la existencia de esta resonancia optó por un grosor de panel de vidrio de 0,3 cm (1/8”) y un espaciado de 0,75 cm (1/4”), con un panel más práctico causaría una resonancia demasiado baja para aparecer en la curva de pérdida de transmisión. La frecuencia de coincidencia se convierte en f = (500x8) = 4 kHz. Para minimizar este efecto de coincidencia en ventanas de doble panel, cada panel debe tener un grosor diferente para que el punto resonante de cada panel se produzca a diferentes frecuencias.

Al igual que en habitaciones, el espacio aéreo entre los dos paneles de una ventana soporta **ondas estacionarias**. Los modos están relacionados con la altura, longitud y profundidad de la cavidad. Es importante conocer las frecuencias modales para determinar el material absorbente que va a amortiguar las resonancias. Absorbentes de fibra de vidrio de pocos centímetros de espesor no absorberán bien frecuencias bajas por lo que resonancias a estas frecuencias serán

significativas. Los absorbentes pueden agregar de 2 a 5 dB de aislamiento a las ventanas de doble panel.

En la mayoría de ventanas de observación de doble panel, uno de los paneles suele estar inclinado respecto a la posición vertical. Este efecto provoca, desde el punto de vista de la acústica de la sala, que los reflejos del vidrio se inclinen hacia los absorbentes del suelo como las alfombras.

Por otro lado, las puertas tienen mayor dificultad de conseguir un sellado fiable con respecto a las ventanas ya que están diseñadas para ser abiertas, los umbrales están expuestos al paso de maquinarias y pisadas. Un panel de puerta pesado y sólido, y un sistema de cierre que sella todo el perímetro alrededor de la puerta suelen cumplir los requisitos de un buen diseño acústico. Los materiales de puertas acústicas suelen ser bastante caros, pero proporcionan la mejor garantía de aislamiento acústico.

El diseño de puertas comunes no es apto para la construcción de estudios de sonido, pueden provocar un descenso de aislamiento y hacer inutilizable la buena acústica proporcionada por una pared fuerte. Las puertas pesadas metálicas ofrecen mejor aislamiento que las puertas ligeras y de madera. El núcleo de una puerta de los hogares tiene una calificación de STC por debajo de 20, sin embargo, un modelo de puerta acústica, diseñada específicamente para estudios de sonido y suministrada por la industria suelen tener calificación STC alrededor de 45. Producirá resultados de forma inmediata y a largo plazo evitando fugas de aire sellando el perímetro de las puertas con tiras de fieltro o espuma de neopreno con respaldo de metal.

3.1.6 Cálculo del aislamiento acústico

3.6.1 Introducción.

Para mediciones in situ, una vez medidos los niveles de presión sonora, se calcula el nivel de presión acústica promediado energéticamente de las diferentes posiciones de micrófono para cada posición de fuente en el recinto emisor y receptor, haciendo uso de la siguiente fórmula: Apartado 7.8.1 [14]:

$$L = 10 \lg\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 10^{L_i/10}\right) \qquad (21)$$

Comentar que se han tenido que hacer correcciones del ruido de fondo en el recinto en algunas bandas de frecuencia. Si la diferencia del nivel de ruido recibido y de fondo es menor de 6 dB, se resta 1.3 dB al nivel recibido. En el caso de diferencias de 6 a 10 dB se aplica la siguiente fórmula: Apartado 9.2 [14]

$$L = 10 \lg(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \qquad (22)$$

Para calcular los índices globales se ha utilizado la ecuación que se presenta a continuación. Con un ejemplo del cálculo de la diferencia de niveles global, según dicta la normativa, el índice global se calcula como diez veces el logaritmo de la media de los valores energéticos para cada posición de fuente.

$$D_{global} = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{\frac{D_{fuente1}}{10}} + 10^{\frac{D_{fuente2}}{10}}}{2}\right) \quad (23)$$

3.6.2 Aislamiento a ruido aéreo

Los parámetros acústicos a calcular para el estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo se dictan en el apartado 3: términos, definiciones y símbolos de la norma UNE-EN_ISO_16283-1 y UNE-EN_ISO_717-1. [14],[15]

Diferencia de niveles, D: Aislamiento acústico específico del elemento separador de las dos salas. Se mide en dB. [14]

$$D = L_1 - L_2 \quad (24)$$

Donde **L_1 y L_2** son los niveles de presión acústica promediados energéticamente en el recinto emisor y receptor, respectivamente.

Diferencia de niveles estandarizada, DnT: Se tiene en cuenta el tiempo de reverberación del recinto receptor (T_R) y se relaciona con un valor prefijado, que suele ser 0,5 s (T_0). Se mide en dB. [14]

$$D_{nT} = D + 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (25)$$

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores, $D_{nT,A}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada, entre recintos interiores, DnT, para ruido rosa. En el anejo A del DB-

HR, explica el procedimiento que consiste en utilizar la curva de referencia de valores del espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A (Lar, i (dBA)) de la tabla A.5. [21]

$$D_{nT,A} = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \qquad [dBA]$$

Diferencia de nivel estandarizada ponderada, $D_{n,T,\ w}$: Valor global en decibelios, de la curva de referencia (norma UNE-EN ISO 717-1), a 500 Hz, ajustada a los valores experimentales de la diferencia de niveles estandarizada ($D_{n,T}$). [15] A continuación, se muestra cómo llevar a cabo el cálculo a partir de la diferencia de nivel estandarizada ($D_{n,T}$) y la curva de referencia extraída de la norma ISO 717-1. Se desplaza la curva de referencia para aproximarse a los valores experimentales medidos y se suman las desviaciones desfavorables de la diferencia entre ambas curvas. El resultado de esta suma no debe exceder el límite exigido por la normativa, en nuestro caso 32 dB. El valor Dn,T será el valor de la curva desplazada a 500Hz.

Términos de adaptación espectral, C y Ctr: Es el valor, en decibelios, que ha de añadirse al valor de las magnitudes globales (R_w y $D_{n,Tw}$) para la representación de resultados exigido por la normativa y tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular. Deben calcularse dos términos de adaptación espectral basados en dos espectros típicos C (espectro del ruido rosa ponderado A) y Ctr (para el ruido de tráfico urbano ponderado A) en los rangos de frecuencia especificados, para C y Ctr entre 100 Hz y 3150 Hz. Estos dos términos pueden complementarse opcionalmente en los términos de adaptación del espectro adicionales cubriendo los rangos de frecuencia ampliados entre 50 Hz y 5000 Hz. [15]

Los términos de adaptación espectral, Cj, deben calcularse con los espectros sonoros mediante la ecuación:

$$C_j = X_{Aj} - X_o \qquad (26)$$

Donde $\mathbf{X_o}$ es el valor de la magnitud global calculado $\mathbf{R_w}$ o $\mathbf{D_{n,Tw}}$ y $\mathbf{X_{Aj}}$ se calcula a partir de:

$$X_{Aj} = -10 \cdot \log \sum 10^{(L_i - X_i)/10} \text{ dB}, \qquad (27)$$

Índice de reducción sonora, R: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo de un elemento constructivo cuando la fuente sonora es un altavoz y la posición del micrófono está sobre la superficie de ensayo. Se evalúa haciendo uso de la siguiente fórmula: [14]

$$R' = D + 10 \lg \frac{S}{A} \qquad (28)$$

Donde:

S área de la muestra de ensayo vista desde el recinto receptor, determinada según el anexo A.

A área de absorción equivalente del recinto receptor. Sabine, $A = \frac{0.16 \text{ x V}}{\text{TR}}$

Índice global de reducción sonora, ponderada A, de un elemento constructivo, R_A: En el anejo A del DB-HR, explica el procedimiento que consiste en utilizar la curva de referencia de valores del espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A (Lar, i (dBA)) de la tabla A.5. Es un valor global, en dBA, del índice de reducción acústica, Ri, para un ruido incidente rosa, normalizado, ponderado A. [21]

$$R'_A = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - R'_i)/10} \quad [dBA] \qquad (29)$$

Índice ponderado de reducción sonora, R_w, de un elemento constructivo: Valor en decibelios de la curva de referencia (norma UNE-EN ISO 717-1), a 500 Hz, ajustada a los valores experimentales del índice de reducción acústica **R**. **[**ISO 717-1**]**

3.6.3 Aislamiento a ruido aéreo de fachada

Esta parte de la norma ISO 16283 especifica los procedimientos para determinar el aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de fachadas (método por elementos) y de fachadas enteras (métodos globales) haciendo uso de mediciones de la presión acústica.

Para el estudio del aislamiento acústico al ruido exterior, se calculan los valores de los parámetros acústicos globales $D_{n,T}$, $D_{2m,nt,A}$ y $D_{2m,nT,Atr}$, además el cálculo de parámetros acústicos por elementos de fachada, R'_{45} y $R'_{45,w}$ según dicta la norma UNE_EN ISO 16283-3.

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT,A}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada en contacto con el aire exterior para ruido rosa. [DB-HR]

$$D_{2m,nT,A} = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [dBA] \qquad (30)$$

Siendo:

$D_{2m,nT,i}$ diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, (dB).

$L_{Ar,i}$ valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i, (dBA).

i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 KHz.

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles, $D_{2m,nT,Atr}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$ para un ruido exterior de automóviles. [DB-HR]

$$D_{2m,nT,Atr} = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [dBA] \qquad (31)$$

Siendo:

$D_{2m, nT, i}$ diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, (dB).

$L_{Atr, i}$ valor del espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, en la banda de frecuencia i, (dBA).

i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 KHz.

Índice de reducción acústica aparente, $R'_{45º}$: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo de un elemento de construcción cuando la fuente sonora es un altavoz colocado a un ángulo de incidencia de 45º y la posición del micrófono exterior está sobre la superficie de ensayo. Se evalúa haciendo uso de la siguiente fórmula: [ISO 16283-3 / 3.12]

$$R'_{45^\circ} = L_{1,s} - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} - 1,5 \text{ dB} \qquad (32)$$

Donde:

S área de la muestra de ensayo determinada según el anexo A.

A área de absorción equivalente del recinto receptor.

Índice de reducción acústica aparente ponderado, $R'_{45º,\ w}$: Valor en decibelios de la curva de referencia desplazada a la frecuencia de 500 Hz, de acuerdo con la norma ISO 717-1.

3.6.4 Aislamiento a ruido de impactos

Para la valoración del aislamiento a ruido de impactos, se calculan los parámetros acústicos según los términos y definiciones dictados en el apartado 3 de la normativa ISO 717-2:2013.

Nivel de presión acústica estandarizado de ruido de impactos, L'_{nT}: Nivel de presión acústica de ruido de impactos, L_i, reducido por un término de corrección expresado en decibelios, igual a diez veces el logaritmo decimal del cociente del tiempo de reverberación medido, T, y el tiempo de reverberación de referencia, T_0, que se calcula haciendo uso de la siguiente fórmula cuando la fuente de impactos es la máquina de impactos. [18]

$$L'_{nT} = L_i - 10 \lg \frac{T}{T_0} \tag{33}$$

Donde T es el tiempo de reverberación del recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia.

Magnitud global ponderada para valoración del aislamiento a ruido de impactos, $L'_{nT,w}$: Es el valor en decibelios, a 500 Hz de la curva de referencia una vez ajustada a los valores experimentales según el método especificado en la Norma ISO 717-2.

Reducción ponderada del nivel de presión sonora de impactos, ΔL_w: Es la diferencia entre los niveles ponderados de la presión de impactos normalizada de un suelo de referencia macizo sin revestimiento, $L_{n,r,0}$ y el suelo con revestimiento.

En la siguiente tabla se muestran los valores de nivel normalizado de presión sonora de impactos de un suelo de referencia. [17]

Frecuencia Hz	$L_{n,r,0}$ dB
100	67
125	67,5
160	68
200	68,5
250	69
315	69,5
400	70
500	70,5
630	71
800	71,5
1 000	72
1 250	72
1 600	72
2 000	72
2 500	72
3 150	72

Tabla 4. Nivel normalizado de presión sonora de impactos de un suelo de referencia. [17]

El nivel normalizado ponderado de presión sonora de impactos del suelo de referencia, $L_{n,r,0,w}$ evaluado de acuerdo al apartado 4.3.1 de la norma ISO 717-2, es 78 dB.

Los valores de la tabla 42 representan una idealización en línea recta, del nivel de presión sonora de impactos de un suelo de losa de cemento.

Debe calcularse el nivel ponderado de la presión sonora de impactos **ΔL_w** de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \tag{34}$$

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} = 78\ \text{dB} - L_{n,r,w} \tag{35}$$

Donde:

$L_{n,r}$ es el nivel normalizado calculado de la presión sonora de impactos del suelo de referencia con el recubrimiento en ensayo.

$L_{n,r,0}$ es el nivel normalizado de la presión sonora de impactos definido para el suelo de referencia.

ΔL es la reducción del nivel de presión sonora de impactos medida de acuerdo con la Norma ISO 10140-1.

$L_{n,r,w}$ es el nivel normalizado ponderado de la presión sonora calculada para el suelo de referencia con el recubrimiento de ensayo.

$L_{n,r,0,w}$ se obtiene de $L_{n,r,0}$ de acuerdo al apartado 4.3.1, ISO 717-2.

Término de adaptación espectral, C_I: Es el valor en decibelios que ha de añadirse a la magnitud global para tener en cuenta la carencia de ponderación del nivel sonoro de impactos, por lo cual representa las características de espectro del ruido de pasos.

Los resultados de la medición L'_n o L'_{nT} en bandas de tercio de octava en el rango de frecuencias de 100 Hz a 2500 Hz, se deben indicar con un decimal, a continuación sumar energéticamente $L'_{n,sum}$ o $L'_{nT,sum}$ y redondear a un número entero.

$$L_{sum} = 10 \lg \sum_{i=1}^{k} 10^{L_i/10} \text{ dB} \tag{36}$$

El término de adaptación del espectro resultante C_I se calcula entonces con un entero a partir de la siguiente ecuación:

$$C_1 = L'_{n,T\text{sum}} - 15 - L'_{nT,\text{w}} \text{ dB} \tag{37}$$

Contribución de la máquina de impactos al ruido aéreo: La contribución de la máquina de impactos al ruido aéreo se puede evaluar siguiendo los pasos dictados en el anexo D.6 de la Norma UNE-EN_ISO_16283-2.

Se determina la diferencia del nivel de presión acústica entre el recinto emisor y el recinto receptor por medio de una señal de ruido rosa procedente de un altavoz colocado en el recinto emisor, $L_{D,spk}$.

Se mide el nivel de presión acústica en el recinto emisor procedente de la máquina de impactos, $L_{S,tm}$.

Se mide el nivel de presión acústica en el recinto receptor procedente de la máquina de impactos, $L_{R,tm}$.

Si la diferencia, $L_{S,tm}$ - $L_{D,spk}$ está 10 dB o más por debajo de $L_{R,tm}$ a cualquier banda de frecuencia de interés, la influencia del rudo aéreo procedente de la máquina de impactos se puede considerar como despreciable

$$L_{S,tm} - L_{D,spk} \leq L_{R,tm} - 10 \tag{38}$$

3.2 Acondicionamiento Acústico

El aspecto fundamental del diseño de estudios de grabación sonora, a parte del aislamiento acústico, es el acondicionamiento acústico del mismo. Este nos permitirá tener una escucha fiel al sonido reproducido por los altavoces y realizar una alta calidad de grabaciones en instrumentos.

Aunque existen diferentes criterios de diseño que se pueden llevar a cabo a la hora de realizar el acondicionamiento acústico en salas de control y grabación, debemos saber que hay ciertos fenómenos comunes para todos ellos.

Para una correcta distribución a la hora de acondicionar, se divide el espectro en zonas y así comprender los problemas que se pueden tener. En la siguiente figura se muestra cómo distribuir las zonas del espectro según la frecuencia de corte.

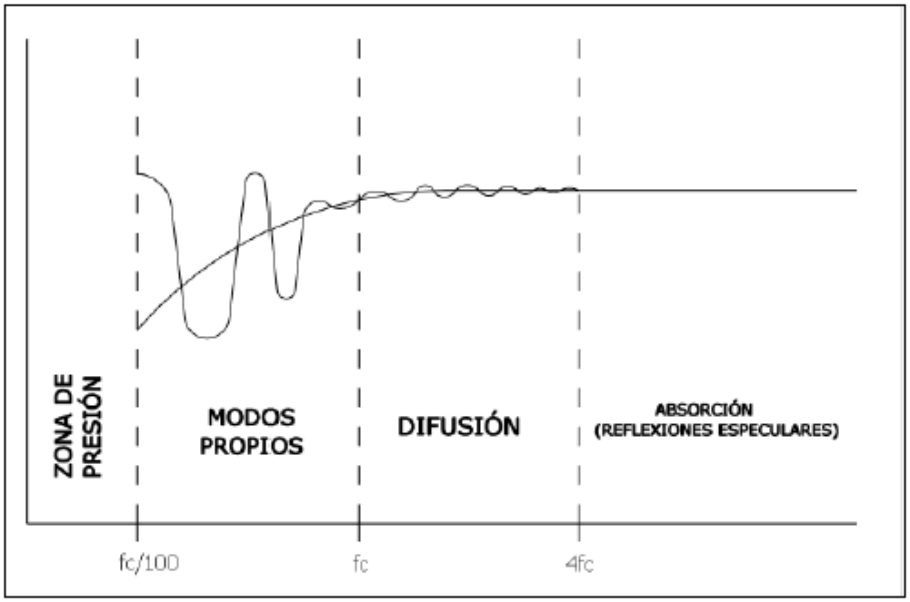


Figura 18. Distribución del espectro en función de una frecuencia crítica. [8]

3.2.1 Modos y geometrías de salas

Uno de los aspectos más importantes de las características acústicas de una habitación es la forma en que las ondas de sonido interactúan entre sí, ya que se reflejan entre las superficies interiores de la habitación. En una sala rectangular, una onda de sonido puede reflejar entre dos superficies opuestas (como dos paredes o entre el suelo y techo), entre cuatro superficies, o entre las seis superficies. Estos patrones de reflexión establecen los modos de sala y, en particular, tres tipos de modos conocidos como axial, tangencial y oblicuo, respectivamente.

A medida que el sonido se refleja entre las superficies, cada modo existe como un reposo que es estático entre las superficies de la habitación con una presión máxima, presión mínima y presión variable en el medio. Los modos existen a una frecuencia fundamental y en frecuencias que son múltiplos de la fundamental.

La frecuencia fundamental de cada modo está determinada por las dimensiones físicas de la habitación y específicamente las distancias entre cada superficie opuesta. Estos modos son fáciles de calcular en una habitación rectangular de seis lados con superficies paralelas. Una habitación con una geometría diferente, por ejemplo, con paredes extendidas, también admite modos, pero la ubicación física de la respuesta de presión de los modos está distorsionada por las superficies no paralelas. El despliegue de muros no resuelve los problemas de modo, solo hace que sea más difícil de predecir.

El problema es particularmente evidente en salas pequeñas porque las dimensiones cortas colocan las irregularidades de respuesta de frecuencia en el rango audible de baja frecuencia.

3.2.1.1 Frecuencia de corte de la habitación

La frecuencia de corte ayuda a establecer la zona de transición en una sala entre análisis de salas grandes y pequeñas. La frecuencia de corte puede ser estimada mediante el tiempo de reverberación y el volumen de la habitación:

$$Fc = 1849 \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{TRmid}}{\mathrm{V}}} \qquad (39)$$

Donde:

Fc = frecuencia de corte, Hz.

TR_{mid} = tiempo de reverberación medio (entre 500 Hz y 1 kHz), segundos.

V = volumen de la sala, m^3.

Cuando el volumen de una habitación es grande en comparación con la longitud de onda del sonido, es decir, para frecuencias superiores a la frecuencia de corte, la perspectiva de los rayos del sonido se cumple.

Debajo de la frecuencia de corte, el concepto de rayos del sonido tiene poco significado, en su lugar, debe usarse el análisis de modo de sala. Por el contrario, por encima de la frecuencia de corte, porque los modos están tan densamente espaciados y no se puede usar el análisis de modo de sala.

En salas pequeñas del tamaño de la mayoría de los estudios de grabación, salas de escucha y salas de control, la acústica de baja frecuencia del espacio está dominada por los efectos de modo de sala. Estas resonancias de modo de sala controlan la respuesta de baja frecuencia de la habitación y, como resultado, la respuesta es muy desigual, la respuesta se potencia cuando los modos se refuerzan, y se corta donde los modos son cancelados. Un ejemplo de la respuesta de baja frecuencia de una habitación pequeña se muestra en la siguiente figura.

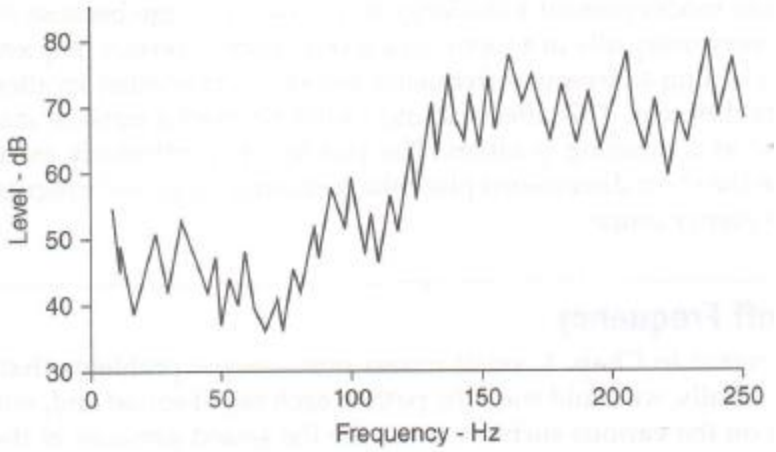


Figura 19. Ejemplo de respuesta de baja frecuencia del sonido en una sala pequeña. [7]

La música excita estas resonancias de sala de baja frecuencia de la forma más transitoria y variable como resultado de las fluctuaciones de tiempo de la señal de música. Estas resonancias deben estudiarse en la habitación porque dictan el campo de sonido de la habitación para el nivel inferior del espectro audible. A frecuencias más altas, los modos están más cercanamente espaciados y su efecto individual a frecuencias específicas se ve disminuido, como resultado, la respuesta en frecuencia a frecuencias más altas es más plana y más consistente. Trampas de bajo y paneles absorbentes se pueden usar para controlar la respuesta irregular de baja frecuencia.

3.2.1.2 Resonancias en salas

El nivel de sonido en la frecuencia de resonancia cambia a medida que un oyente se mueve a lo largo de una onda estacionaria. Esto puede demostrarse con experimentos simples. Algunas frecuencias mostrarán un nulo de baja frecuencia en el centro de la habitación. Esto puede ser problemático porque el centro de la habitación es a menudo el lugar donde un ingeniero de mezcla puede sentarse detrás de una consola o donde un oyente puede sentarse en una sala de escucha. Este nulo es llamado "bass suckout" y debe evitarse si es posible. Por ejemplo, los

extremos opuestos de una habitación no deberían ser altamente reflectantes. En cambio, una de las paredes debe ser absorbente.

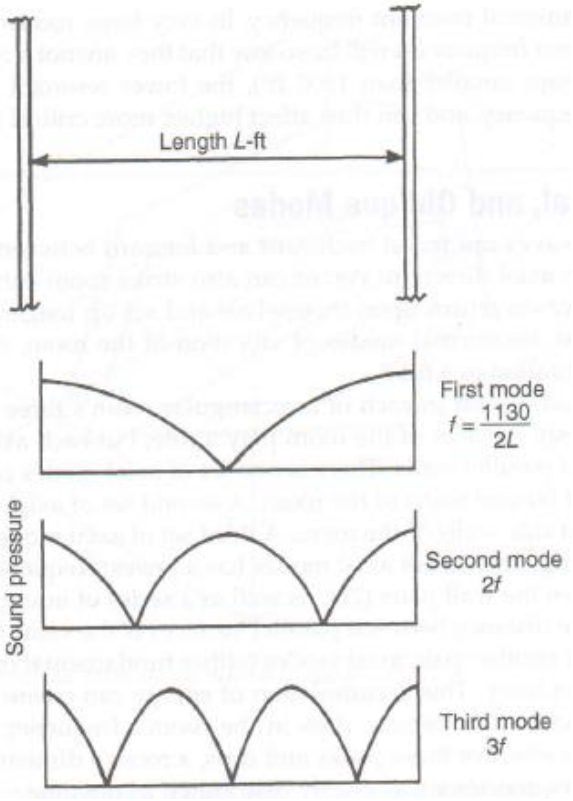


Figura 20. Resonancias modales entre paredes paralelas en una habitación. [7]

En la figura se muestra el primer modo de una onda estacionaria, a la frecuencia fundamental, tiene un máximo presión sonora en la superficie de las paredes, y un nulo a mitad de camino entre ellos. Al doble de esa frecuencia, un segundo modo de onda estacionaria resulta con dos nulos entre las paredes. En tres veces la frecuencia, en el tercer modo, aparecen tres nulos. La presión del sonido es máxima en las superficies para todos los modos. Estos se llaman modos axiales porque el sonido viaja paralelo al eje normal a las dos superficies. Del mismo modo, modos axiales ocurren a lo largo de cada eje de la sala, es decir, la longitud, el ancho y la altura. Como se describe a continuación, también hay otros dos tipos de

modos de habitación, uno basado en reflexiones tangenciales, y el otro en reflexiones oblicuas.

3.2.1.3 Modos axial, tangencial y oblicuo

En una habitación, las ondas pueden viajar hacia atrás y hacia adelante entre dos paredes opuestas, es decir, en una dirección axial. Las olas también pueden golpear superficies de la sala en ángulos.

Además de los modos axiales, las salas también pueden resonar en modos tangencial y oblicuo, como se muestra en la siguiente figura.

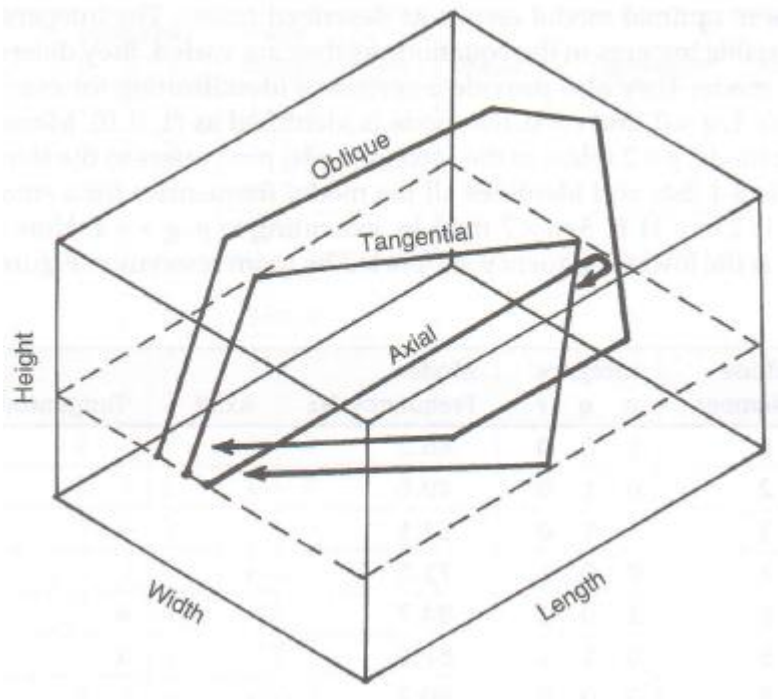


Figura 21. Comparación de modos axial, tangencial y oblicuo. [7]

Los modos tangenciales ocurren para una onda que golpea cuatro paredes y vuelve a su lugar de partida. Al igual que con los modos axiales, existen modos

tangenciales en cada uno de las tres dimensiones de la habitación y aparecen como una serie de frecuencias múltiples integrales. Los modos oblicuos golpean las seis superficies de una sala en cada viaje de ida y vuelta. Al igual que con modos axiales, modos oblicuos usan las tres dimensiones de sala y tienen una serie de frecuencias múltiples.

Los modos axial, tangencial y oblicuo tienen diferentes niveles de energía. Los modos axiales contienen mayor cantidad, debido a la limitación de reflexiones. Sólo una evaluación de los modos axiales podría dar una buena estimación de la ejecución de un espacio en consideración.

Debido a que los modos tangenciales golpean cuatro superficies, tienen menos energía que los modos axiales, y son menos consecuentes. Del mismo modo, los modos oblicuos golpean las seis superficies de la habitación, por lo que tienen menos energía que ya sea modos axiales o tangenciales. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la absorción es menor para ángulos de incidencia tan pequeños en comparación con el ángulo de incidencia perpendicular eso ocurre con los modos axiales. En particular, los modos tangenciales tienen solo la mitad de la energía de los modos axiales, lo que significa que se reducen en 3 dB. Modos oblicuos, teniendo solo un cuarto de la energía de los modos axiales, se reducen en 6 dB, según dictan Morse y Bolt, en 1944 [7].

3.2.1.4 Ecuación de los modos de sala

Para una habitación rectangular, hay tres pares de superficies paralelas opuestas. Están asociados con la longitud L, ancho W y altura H de la habitación. La ecuación para calcular las frecuencias de todos los modos normales de resonancia es:

$$f = \frac{c}{2}\sqrt{\frac{p}{L}^2 + \frac{q}{W}^2 + \frac{r}{H}^2} \qquad (40)$$

Donde:

f = frecuencia del modo, Hz.

c = velocidad del sonido = $3 \cdot 10^8$ (m/s).

L, W, H = longitud de sala, ancho, alto, (metros).

p, q, r = 0, 1, 2, 3, etc

Los parámetros p, q y r son enteros variables en la ecuación. Como son variables, determinan la frecuencia de cada modo. También proporcionan un sistema de identificación para cada modo. Por ejemplo, si p = 1, q = 0, y r = 0, el modo se identifica como (1, 0, 0). Para p = 1 se refiere al primer modo, p = 2 se refiere al segundo modo, p = 3 se refiere al tercer modo, y así sucesivamente.

En la siguiente figura se muestra por separado tres modos de una sala. En esta figura, la variable p se establece en 1, 2 y 3, produciendo los primeros tres modos axiales a lo largo de la habitación.

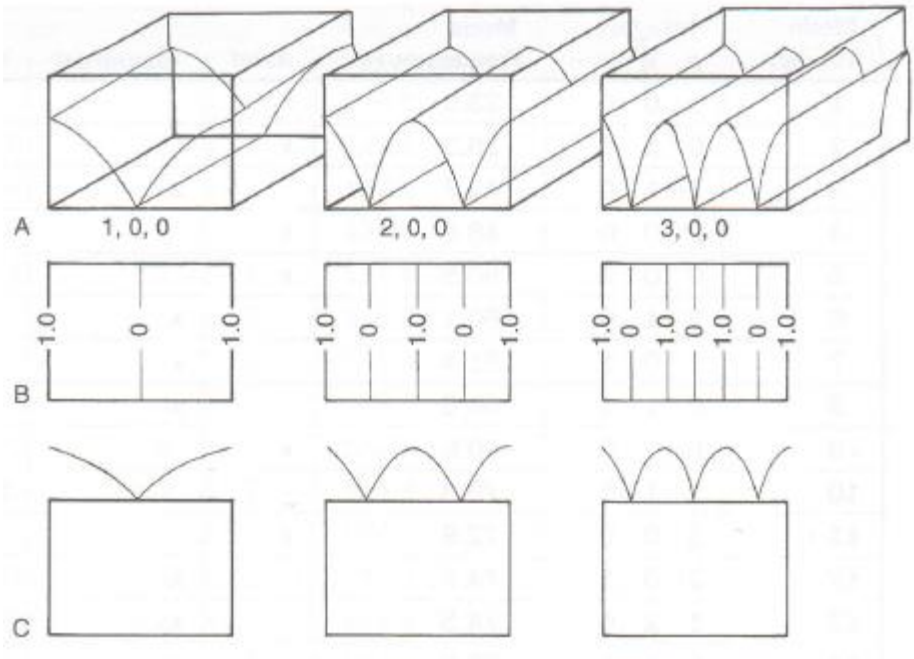


Figura 22. Diagrama de los tres primeros modos axiales a lo largo de una habitación. (A) Vectores de sonido, aumento a una altura dependiendo de la presión de sonido en ese punto. (B) Un plano trazado del contorno de la presión sonora. (C) Esquema de presión sonora sobre el suelo. [7]

Cuando un altavoz reproduce el sonido de la música en una habitación, la presión del sonido en un punto dado en cualquier instante es la suma total de todos estos modos de habitación que cambian rápidamente.

Es interesante comparar los modos de una sala grande con los de una sala más pequeña. La sala más grande tiene mayor número de frecuencias modales por debajo de 250 Hz, mientras que la habitación más pequeña solo tiene 56 modos. En la sala más grande, los modos comienzan en frecuencias más bajas y son más estrechamente espaciados. Esto demuestra por qué las habitaciones pequeñas presentan problemas de modo, mientras que las habitaciones grandes no se ven afectadas.

3.2.1.5 Distribución modal de salas no rectangulares

Algunos diseñadores de salas fomentan el uso de paredes extendidas y espacios no rectangulares para mejorar la distribución del sonido en la adaptación de un espacio existente, el despliegue de paredes es generalmente caro. En las construcciones nuevas, este despliegue de paredes se puede conseguir por un coste razonable.

No hay dudas sobre la efectividad del ensanchamiento de paredes en la eliminación del eco de aleteo. El eco del aleteo se produce cuando el espacio entre dos superficies paralelas reflectantes está excitado por un sonido impulsivo. El tren de múltiples reflexiones con estas características de sonido de aleteo puede ser muy audible e inquietante. Paredes ensanchadas para eliminar el eco del aleteo es excesivo, el eco de aleteo se elimina fácilmente por la estratégica colocación de algunos absorbentes o difusores.

El objetivo de romper los patrones de ondas estacionarias en el espacio es otra razón avanzada para el uso de salas no rectangulares. En la siguiente figura, la sala rectangular es indicada por líneas discontinuas, y la habitación no rectangular por líneas continuas.

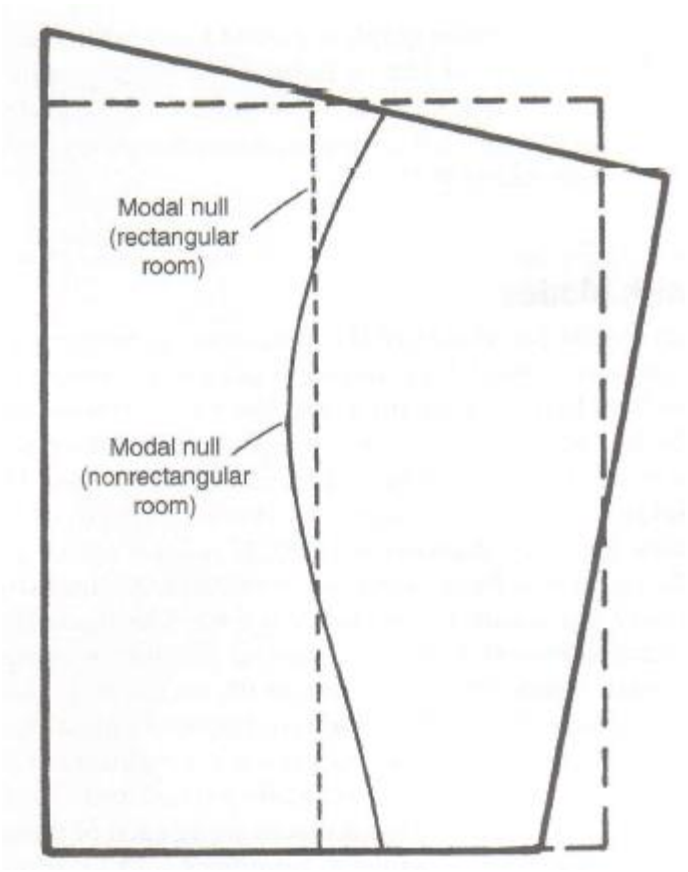


Figura 23. Efecto del ensanchamiento de paredes en modos de distribución de salas.

Al pasar de una habitación rectangular a su contraparte ensanchada, como se muestra en la figura, el nulo de un modo (1, 0,0) solo se distorsiona, no se elimina. Del mismo modo, las frecuencias de los modos normales cambian un poco, no se eliminan. En algunos diseños, la pared trasera de las salas de control de los estudios de grabación se extiende.

Siempre existirá la controversia de que algunos preferirán la previsibilidad del campo de sonido de onda estacionaria de una habitación rectangular sobre el campo intratable, distorsionado de una habitación no rectangular.

3.2.1.6 Conclusiones

Claramente, los modos de sala tienen efectos adversos en la respuesta de baja frecuencia de una habitación y son particularmente problemáticos en habitaciones pequeñas. Parece lógico que las habitaciones deben ser cuidadosamente diseñadas para dimensiones óptimas.

Las dimensiones de la sala que son múltiplos iguales o simples entre sí deben evitarse. Los investigadores tienen identificada relaciones de dimensiones de sala que distribuyen las frecuencias modales de manera más uniforme al espectro. Cuando sea posible, esta contramedida debe ser implementada.

En la mayoría de los casos, el modo de sala de baja frecuencia crea problemas en las habitaciones pequeñas. Por lo tanto, nunca pueden ser eliminados en la fase de diseño de una nueva sala, los modos deben identificarse y tratarse con medidas acústicas. Por ejemplo, la construcción de paneles de yeso que se encuentra en muchos edificios proporcionará una absorción de baja frecuencia de banda ancha que tenderá a aplanar la curva de respuesta de la habitación. Al disminuir la energía de los bajos, hay menos interferencia constructiva para producir picos, y menos interferencia destructiva para producir nulos. Otras medidas como trampas de bajos y resonadores Helmholtz también se pueden utilizar para abordar el problema de modos. Con una atención cuidadosa, los modos se pueden administrar y las habitaciones pequeñas pueden exhibir una respuesta de baja frecuencia satisfactoria.

3.2.2 Difusión

Se entiende por difusión del sonido al fenómeno que se produce cuando el sonido incidente sobre una superficie es reflejado en múltiples direcciones. Se produce cuando las dimensiones del objeto sobre el que impacta el sonido son proporcionales a la longitud de onda del mismo.

En la siguiente figura se compara el efecto producido sobre una onda incidente ante distintos materiales absorbentes, reflectores y difusores.

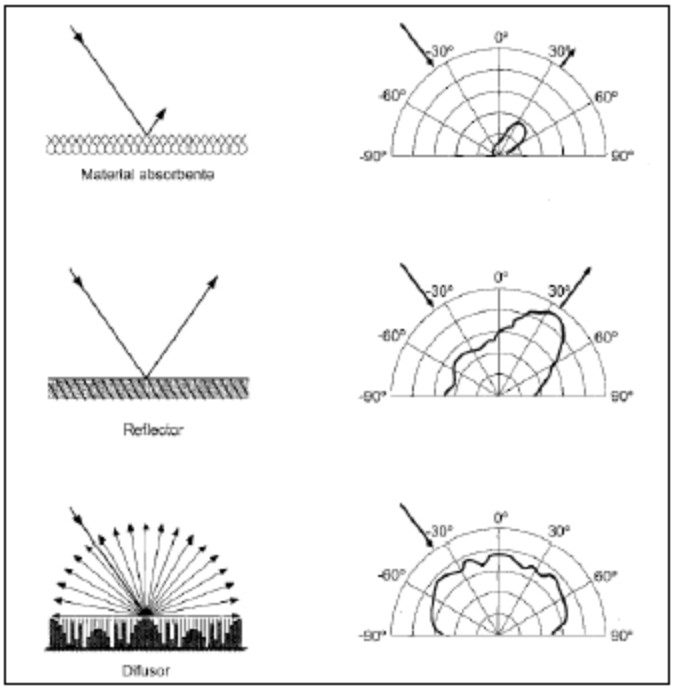


Figura 24. Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión y difusor. [9]

Observando la figura, se deduce en primer lugar que ante un material absorbente la cantidad de energía reflejada es muy pequeña. Por otro lado, vemos como el material reflector si refleja una mayor cantidad de energía, pero se proyecta en la dirección de la reflexión. Por último, vemos como para el caso de los

difusores, la cantidad de energía reflejada es muy grande (no tanto como un material reflector) pero la dirección de la misma es mucho más uniforme que para el caso anterior.

Debido a la lobulación del sonido producida en puntos próximos del elemento difusor que se puede apreciar en la siguiente figura, su instalación en estudios de grabación deberá realizarse siempre que tenga un volumen adecuado. La distancia debe compararse con la longitud de onda de la frecuencia de trabajo considerada, dado que estos sistemas trabajan en un rango de frecuencias superior a los 500 Hz y la distancia óptima a la que deberíamos de situar el difusor sería de unas tres veces la longitud de onda, según estudios realizados por Peter D´Antonio y Trevor Cox. [4]

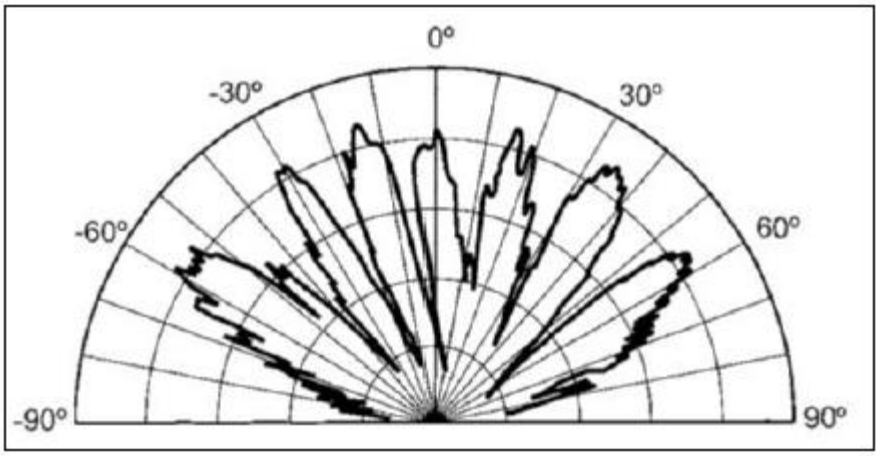


Figura 25. Diagrama del efecto de lobulación del sonido en difusores. [9]

La difusión se utiliza normalmente para conseguir que la energía del campo reverberante llegue a los oídos del oyente desde todas las direccione del espacio. Por lo que contribuirá a crear un sonido envolvente y por tanto se consiga una correcta sensación espacial.

A continuación, se explican distintos tipos de materiales difusores más representativos.

3.2.2.1 Difusores policilíndricos

Los difusores policilíndricos están formados por un conjunto de superficies lisas de forma convexa, cuyo radio de curvatura no puede ser mayor que cinco metros. Normalmente son construidos con planchas de madera.

Figura 26. Ejemplo de difusor policilíndrico.

3.2.2.2 Difusores de Schroeder

Diseñados para trabajar en un margen específico del espectro. Se basa en la teoría de los números desarrollada por Manfred R. Schroeder, que trata de distintas secuencias matemáticas que se repiten.

Normalmente se construyen a base de madera. A continuación, se describen algunos de los tipos de difusores de Schroeder que existen.

3.2.2.2.1 Difusores MLS

Los difusores MLS (Maximum Lenght Sequence) están basados en unas secuencias psudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima o de Galois, las cuales sólo se pueden adquirir dos valores: -1 y +1.

La anchura y profundidad, tendrán un tamaño igual a λ/2 y λ/4 respectivamente, donde λ es la longitud de onda de la frecuencia de diseño del difusor.

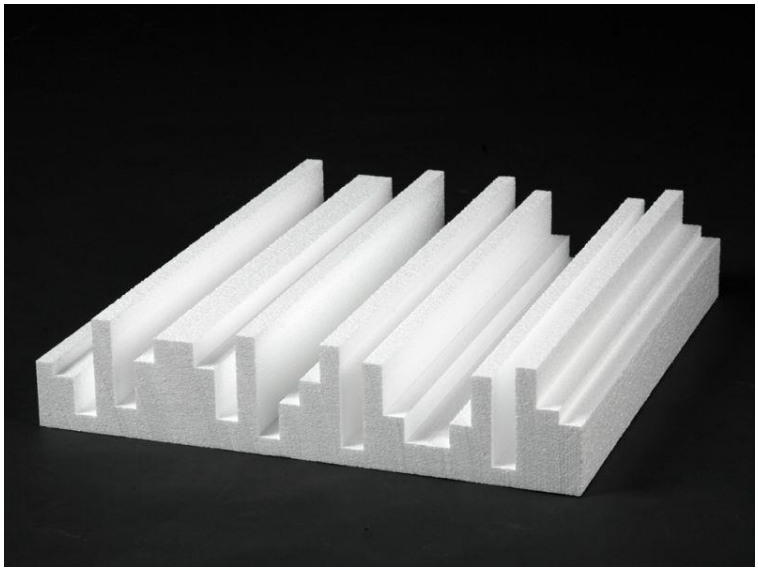


Figura 27. Difusor MLS.

El margen de frecuencias para el cual es válido este tipo de difusor es únicamente del orden de una octava, por lo que en la práctica no es un difusor muy útil.

3.2.2.2.2 Difusores QRD

Los difusores QRD (Quadratic-Residue Diffusor), se pueden dividir en unidimensionales y bidimensionales. Los primeros de ellos son los más usados a nivel práctico.

Formados por una serie de ranuras paralelas de forma rectangular de igual anchura y distinta profundidad.

La profundidad de cada una de las ranuras se obtiene a partir de una secuencia matemática que da lugar a una estructura periódica, lo cual provoca, en un determinado margen de frecuencias, una difusión del sonido incidente en planos perpendiculares a dichas ranuras.

Dicha secuencia, la cual nos proporciona las distintas profundidades y nos permite conseguir la distribución de energía reflejada lo más uniforme posible en todas direcciones del espacio, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$S_n = n^2 \, mod \, p \qquad (41)$$

Donde p = números primos, n = número entero desde 0 hasat p-1 y mod = operación matemática módulo, que indica que cada valor de s_n se obtiene como el resto o residuo del cociente entre n^2 y p. [8]

Figura 28. Difusor QRD unidimensional. [10]

La frecuencia más elevada para la cual se produce difusión del sonido aumenta a medida que la anchura de las ranuras disminuye, por tanto, la frecuencia más baja disminuye a medida que aumenta la máxima profundidad. Se ha podido comprobar que las ranuras más estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica.

El otro tipo de difusores QRD bidimensional, surge de la necesidad de obtener un grado satisfactorio de difusión en todas las direcciones del espacio. En este tipo de difusores, las ranuras son sustituidas por huecos cuadrados de profundidad variable, como podemos ver en la siguiente figura.

Figura 29. Difusor bidimensional. [10]

Para el cálculo de este tipo de difusores se usan las mismas técnicas que para los unidimensionales, con la excepción de la expresión utilizada para el cálculo de las distintas profundidades de cada uno de los módulos.

La profundidad real de cada uno de los módulos se podrá calcular mediante la misma expresión que con los difusores unidimensionales.

3.2.2.2.3 Difusores PRD

Los difusores PRD (Primitive-Root Diffusor) o de raíces primitivas son iguales a los QRD unidimensionales, salvo por que la secuencia generadora para el cálculo de profundidades de cada una de las ranuras se calcula a partir de otra expresión.

$$S_n = g^n mod\ p \qquad (42)$$

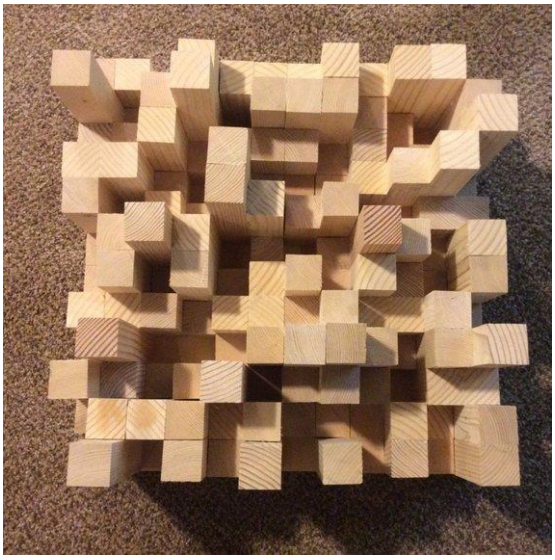


Figura 30. Difusor PRD. [10]

Como se puede observar, el perfil de los difusores PRD, a diferencia de los QRD, no tiene simetría en cada uno de los periodos. Por otro lado, comentar que con respecto a los difusores QRD unidimensionales, estos no presentan energía asociada a la reflexión especular por lo que suelen ser muy prácticos a la hora de eliminar ecos localizados.

3.2.3 Absorción

La absorción se utiliza para reducir los niveles de sonido en una habitación y para controlar ciertas reflexiones, es una de las técnicas más básicas en el tratamiento de la habitación. La absorción determina directamente el tiempo de reverberación de una habitación y la ubicación estratégica de la absorción en las superficies de la habitación puede amortiguar reflejos no deseados específicos. La cantidad óptima de absorción en una habitación depende del propósito acústico de la sala.

Los absorbentes de sonido se pueden clasificar en tres tipos: materiales porosos, resonadores de membrana o diafragmáticos y absorbentes de volumen o resonadores (Helmholtz). Cada uno de estos absorbentes usa el mismo mecanismo básico para absorber el sonido. Convierten la energía de la vibración en ondas sonoras en una pequeña cantidad de calor, que se disipa. Los absorbentes porosos atrapan las ondas de sonido dentro de un material poroso y disipan esa energía a través de la fricción. Los paneles y absorbentes de volumen son similares, ambos disipan la energía del sonido a través de la resonancia.

Las propiedades de absorción de los materiales suelen depender de la frecuencia. Un absorbente poroso puede ser muy absorbente a altas frecuencias, y no absorbente a bajas frecuencias. Un absorbente de panel puede ajustarse para absorber en una región de frecuencia media. Una trampa de graves solo puede absorber muy bajas frecuencias.

A continuación, se van a explicar dos tipos de sistemas absorbentes, los absorbentes porosos y los resonadores.

3.2.3.1 Absorbentes porosos

Cuando el sonido incide sobre una superficie porosa, una parte se absorbe y otra se refleja. En particular, a medida que el sonido penetra dentro de un material poroso, las moléculas de aire que vibran (sometidos a compresión y refracción) imparten movimiento a las pequeñas fibras internas.

Tal movimiento encuentra resistencia ya que la roza la fibra y esta resistencia genera una pequeña cantidad de calor. Así, la energía acústica absorbida cambia a energía térmica, la cantidad de calor producido es tan pequeña que no se nota.

Hay muchos tipos de materiales porosos que absorben el sonido. El factor determinante en la absorción es la longitud de onda del sonido que se está considerando. Para ser un buen absorbente, un absorbente poroso debe tener un grosor que corresponda a una fracción significativa de una longitud de onda. Por lo tanto, no es práctico construir un absorbente poroso a dimensiones muy grandes para atacar frecuencias graves, los absorbentes porosos no son usados a bajas frecuencias. Por otro lado, los absorbentes porosos son más efectivos en frecuencias más altas y para frecuencias graves o bajas se usan las trampas de graves situados en las esquinas del recinto donde la presión de estas frecuencias es máxima.

3.2.3.2 Trampa de graves

Las trampas de graves se pueden usar para proporcionar absorción a frecuencias muy bajas. Hay mucha tradición relacionada con trampas de graves por su sencillez de diseño.

En particular, pueden optimizarse y ajustarse haciendo la profundidad de la trampa de un cuarto de longitud de onda de la frecuencia deseada de absorción máxima. En las salas de control, las trampas a veces se colocan en el suelo, entre el escritorio y la ventana de observación, o se pueden establecer en las esquinas, casi en cualquier lugar.

El término con razón se refiere a un tipo muy específico de absorbente de bajos. En la siguiente figura, muestra el requisito principal de una trampa de bajos, es decir, una estructura con una longitud de onda de un cuarto de profundidad. La velocidad de la partícula de aire es máxima en la superficie de la trampa, lo que significa que la fibra de vidrio cercana a esa región de alta velocidad de partículas es

muy absorbente. La presión de sonido es cero en la superficie. Esta baja presión significa que la trampa absorbe la energía del sonido cerca de la frecuencia máxima en la trampa del área circundante cercana. [7]

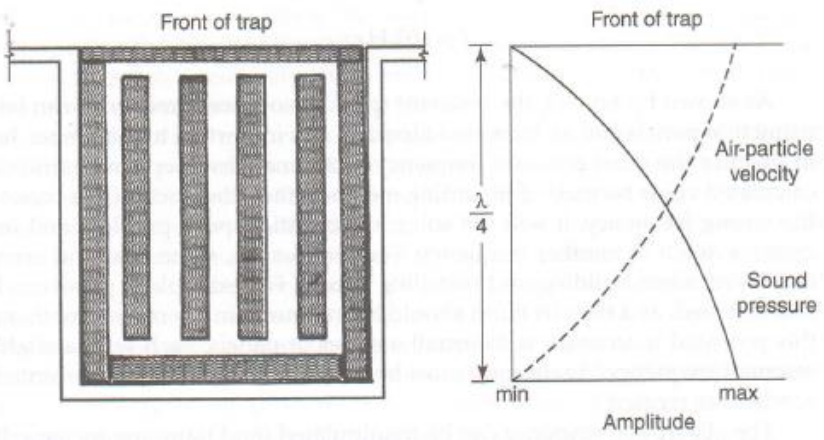


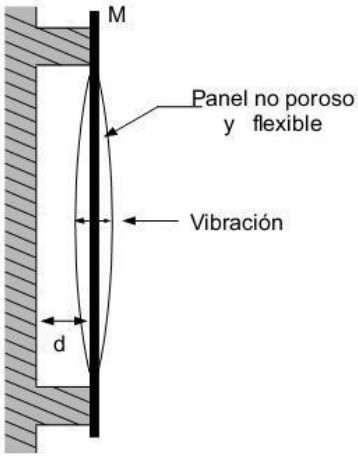
Figura 31. Diseño de una trampa de graves con diagrama de la velocidad de las partículas del aire y presión del sonido en un cuarto de longitud de onda desde la parte trasera de la trampa. [7]

3.2.4 Resonadores de membrana o diafragmáticos

Este tipo de absorbentes reciben el nombre de absorbentes selectivos debido a que su rango de trabajo se centra en una zona determinada del espectro. Suelen estar formados por una superficie de algún material impermeable al aire, colocado sobre unos bastidores a una distancia determinada de una superficie rígida.

El funcionamiento de este tipo de absorbentes se basa en la idea de que cuando una onda sonora incide sobre la superficie, ésta comienza a vibrar originándose un movimiento en el cual se producirá una pérdida de energía de la onda sonora incidente al transformase ésta en calor. La máxima absorción se producirá a la frecuencia de resonancia del sistema que normalmente será a baja frecuencia.

En la siguiente figura, se muestra el esquema de este tipo de resonadores.



Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático
"Diseño acústico de espacios arquitectónicos"
Antoni Carrión Isbert. Ediciones UPC.

Figura 32. Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático. [10]

Además, se puede calcular la frecuencia de resonancia del sistema mediante la expresión:

$$fr = \frac{60}{\sqrt{m_s \cdot d}} \text{ (Hz)} \qquad (43)$$

Donde m_s es la masa del panel por unidad de superficie Kg/m^2 y d la profundidad de la cámara de aire en metros.

En el interior de la cámara de aire se puede colocar material absorbente poroso, ya sea cubriendo la parte interior o alrededor de los bordes del sistema, la frecuencia de resonancia de este disminuye, pero aumenta el rango de frecuencias sobre el que el resonador actúa.

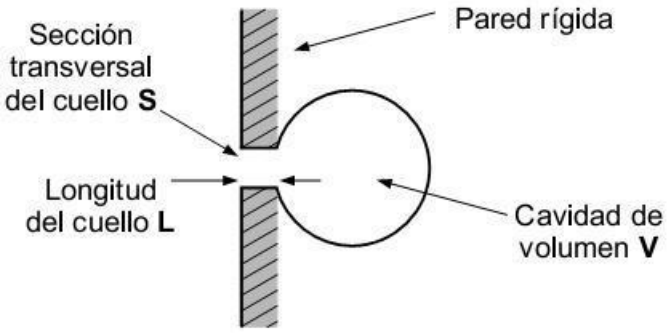
Este tipo de sistemas absorbentes es efectivo en baja frecuencia para frecuencias por debajo de 500 Hz. [11]

3.2.5 Resonador acústico de Helmholtz

3.2.5.1 Resonadores simples de cavidad Helmholtz

Está formado por una cavidad cerrada de aire conectada a la sala a través de una abertura o cuello estrecho.

El aire del cuello se mueve como una unidad, y constituye el elemento de masa, mientras que el aire de la cavidad se comporta como un muelle, constituyendo el elemento de rigidez. De forma análoga al resonador de membrana, la masa del aire del cuello junto con la rigidez del aire de la cavidad da lugar a un sistema resonante que presenta un pico de absorción a la frecuencia de resonancia.



Esquema básico de un resonador simple de cavidad (Helmholtz) montado en una pared

"Diseño acústico de espacios arquitectónicos"
Antoni Carrión Isbert. Ediciones UPC.

Figura 33. Esquema básico de un resonador simple de cavidad Helmholtz. [10]

3.2.5.2 Resonadores múltiples de cavidad a base de perforaciones o ranuras

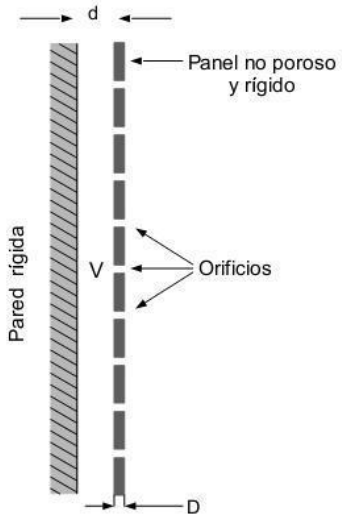
Dado que los resonadores de cavidad simple trabajan en un rango muy estrecho de frecuencia, el uso de resonadores múltiples nos permitirán aumentar dicho rango de trabajo.

Está formado por un panel de un material no poroso y rígido de espesor D, en el que se han practicado una serie de perforaciones circulares o ranuras, montado a una cierta distancia "d" de una pared rígida, a fin de dejar una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies.

El resonador múltiple de cavidad puede ser considerado de cualquiera de las siguientes maneras:

- Como un resonador de membrana en el que la masa del panel ha sido sustituida por la masa del aire contenido en cada perforación o ranura. En este caso, es precisamente dicho aire, y no el panel, el que entra en vibración cuando una onda sonora incide sobre el elemento.

- Como un conjunto de resonadores simples de Helmholtz que comparten una misma cavidad. Dicha cavidad actúa a modo de elemento acoplador entre los diferentes orificios practicados.



Esquema básico de un resonador múltiple de
cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados

"Diseño acústico de espacios arquitectónicos"
Antoni Carrión Isbert. Ediciones UPC.

Figura 34. Esquema básico de un resonador múltiple de cavidad Helmholtz a base de paneles perforados o ranurados. [10]

3.3 Filosofía de diseño

En este apartado se procede a recorrer las principales técnicas de diseño en estudios de grabación, centrándonos en las que resulten más interesantes para un diseño posterior. Desde los años 60, las filosofías de diseño de estudios de sonido se han centrado exclusivamente en las salas de control, por ser los más críticos desde el punto de vista del diseño acústico.

3.3.1 Salas de Control

Muchos son los criterios de diseño de salas de control que se han ido desarrollando hasta la actualidad ante la necesidad de tener una buena escucha. Se intentará controlar, sobretodo, el tiempo de reverberación en todas las frecuencias.

3.3.1.1 Non-Environment. Tom Hidley

El principal objetivo de esta técnica es proveer condiciones de monitorización lo más cercanas posibles a las que se conseguirían en campo libre. Esto permite reducir tanto el tiempo de decaimiento de las reflexiones, como la energía modal hasta tal punto que es posible percibir muchos defectos en las grabaciones de manera fácil.

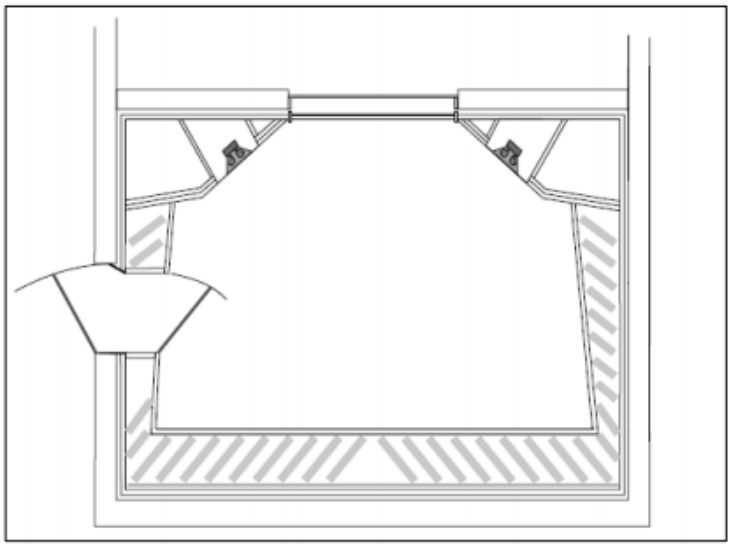


Figura 35. Planta de sala de control Non-Environment. [8]

Tanto las paredes laterales, como la trasera, están formadas por sistemas absorbentes de banda ancha compuestas por *hangers*. Además, la pared frontal y el suelo son totalmente reflectantes.

Los problemas que nos puedan producir la mesa de mezclas o cualquier otro equipo que se encuentre en el camino directo entre los monitores y el técnico puede ser fácilmente eliminados, proporcionando una angulación apropiada a estos equipos de manera que las reflexiones sean redireccionadas hacia posiciones lejanas del punto de escucha.

Uno de sus puntos buenos de estos diseños Non-Environment es que consiguen una gran uniformidad para distintos tamaños, pero en contra su implementación es bastante cara por la necesidad de materiales necesarios para su construcción.

Estas salas tienen una gran absorción en alta y medias frecuencias, la cual se consigue con la utilización de materiales porosos convencionales. Para la absorción en baja y media-baja frecuencia se consigue con la construcción de laberintos acústicos a través de los cuales las ondas son guiadas, difundidas y difractadas. Al final de estos conductos se instala un resonador de membrana a base de un material pesado, para atacar a la muy baja frecuencia.

Con todo esto lo que se consigue es que, al tener un grado de absorción tan alto en un conjunto ancho de banda de frecuencias, las posibles perturbaciones debidas a la habitación que se produzcan en el campo sonoro se harán evidentes a un nivel mucho más bajo que el sonido directo de los monitores, lo cual provocará que queden enmascaradas.

3.3.1.2 Criterio LEDE. Davis (1981)

Uno de los primeros criterios que persiguió unos objetivos estandarizados de diseño fue el criterio LEDE (Live-End-Dead-End). La idea básica del diseño consiste en evitar que lleguen al punto de escucha reflexiones con un nivel tan alto que puedan crear el típico efecto de filtro peine que se produce cuando a una señal se le suma una réplica retardada.

El sentido de este diseño es permitir que el ITD (Initial Time Delay) de la sala de grabación pueda ser producido completamente en el interior del control.

Peter D`Antonio y John Konnert mejoran el concepto LEDE gracias a los avances realizados por Schröeder en el campo de la difusión y a la supresión de la parte delantera totalmente absorbente introduciendo el concepto RFZ (“Reflexion Free Zone”).

Este concepto consiste en direccionar las primeras reflexiones que se producirán en la parte delantera del recinto mediante el direccionamiento con superficies reflectoras a la parte de atrás de la sala donde se encontrarán instalados unos difusores que permitirán reducir la energía de estas reflexiones y crear un campo difuso.

Las paredes encargadas de direccionar las reflexiones estarán compuestas de materiales ligeros (madera, placas de yeso …) y construidas normalmente dentro de un recinto paralelepípedo, por lo que para el estudio de la zona de baja frecuencia no se tendrán en cuenta estos parámetros y se considerarán solo los parámetros exteriores que se suponen lo suficiente rígidos.

Por lo tanto, el criterio de diseño LEDE se puede resumir en los siguientes puntos:

- Recinto contenedor con paredes duras y asimétricas con el fin de minimizar los modos propios del recinto. Además, deberá ser lo suficientemente grande para permitir correcto desarrollo de las ondas de baja frecuencia.

- Deberá haber un camino anecoico entre los altavoces y los oídos del técnico. Con esto, se deberá cumplir que el ITD del control será, por lo menos, 2-5 ms más que el ITD del estudio.

- Deberá haber un campo altamente difuso entre la frecuencia de corte (fc) y cuatro veces esta (4fc). Deberá llegar a nuestros oídos teniendo en cuenta el efecto Haas, es decir, las reflexiones difusas deberán llegar después de 10-20 ms del sonido directo.

- Los monitores, las técnicas microfónicas y la mesa de mezclas no deberán enmascarar el camino anecoico deseado entre los monitores y los oídos del técnico de sonido teniendo en cuenta el camino recorrido desde la parte de atrás de los monitores hasta los oídos (2-5 ms mayor que el ITD del estudio)

- La pared dura trasera, las traseras laterales, y la parte de atrás del techo deberán estar espaciadas de tal forma que las reflexiones que se generen en esta zona deberán proporcionar un patrón de filtro peine tan complejo y de tal densidad que las posibles anomalías no sean medibles.

Una extensión habitual en este tipo de diseños es la propuesta por Peter D`Antonio en el año 1984. Propuso la creación de una zona alrededor del punto de escucha libre de reflexiones (RFZ) usando un sistema de monitoraje con los altavoces empotrados en la pared. La forma de conseguir esta zona libre de reflexiones simplemente consiste en angular las paredes de tal manera que ninguna reflexión llegue hasta nuestro oído, tal y como podemos ver en la figura.

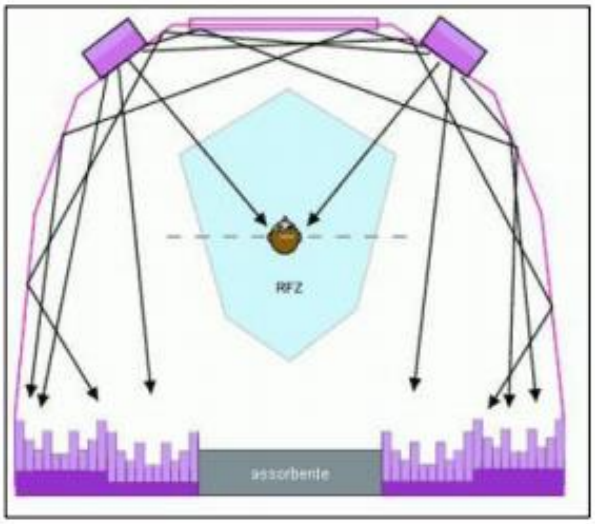


Figura 36. Principio de diseño RFZ de Peter D`Antonio. [8]

3.3.2 Salas de grabación

La mayoría de las características aplicables al diseño de salas de control pueden ser aplicadas a este tipo de recintos.

La primera, como parece obvio, es la distribución modal. El recinto deberá tener una relación entre sus dimensiones tales que la distribución modal de éste sea lo más óptica posible, acercándose en la medida de lo posible a los mejores ratios. Conseguiremos que no haya excesivas frecuencias de resonancia en la sala y, por tanto, que tengamos una respuesta plana.

Otra característica deseable para este tipo de recintos es que sean neutrales, es decir, debe ser una sala suficientemente viva como para permitir que las características sonoras de los instrumentos sean aparentes, pero sin realzarlas demasiado por la influencia de la sala. Esto se traduce en disponer dentro de la sala de un tiempo de reverberación con una suave

caída junto con reflexiones discretas que añadirán vida al instrumento, pero sin modificar la naturaleza de éste.

Además, este tipo de recinto debe de estar diseñados en función del tipo de música o instrumento que en ellos va a ser grabado. Parece lógico que las necesidades de grabación de una voz no serán las mismas que las de una batería. Normalmente, para las voces necesitaremos un recinto muerto, es decir, con un tiempo de reverberación bajo, mientras que para las baterías será mucho mejor tener un tiempo de reverberación más elevado.

Otra característica deseable para este tipo de recintos es que tengan un volumen que sea algo mayor que las salas de control. El objetivo de esto es conseguir que el tiempo de reverberación de la sala de grabación pueda ser escuchado completamente en la sala de control, y así evitar el enmascaramiento al reproducir el sonido en la sala de control.

Por otro lado, y de cara a evitar ecos de aleteo y la creación de ondas estacionarias se suele recomendar que las paredes de este tipo de recintos no sean paralelas, debiendo tener ángulos grandes de aproximadamente 15º.

Finalmente, el objetivo de las salas de grabación será albergar instrumentos de muy diversa índole, por lo tanto, una buena idea puede ser diseñar la sala con acústica variable y poder adecuar las características acústicas de ésta a cada tipo de instrumento a grabar.

3.4 Metodología de diseño.

3.4.1 Normativas y recomendaciones

Se llevará a cabo la una visión general del estado del arte relativo a este campo, ya que existe una falta de estándares que nos permiten seguir los pasos para un correcto diseño de un estudio de grabación sonora debido a la dificultad que implica un proceso de estas características.

Existen publicaciones que permiten hacernos una idea de los pasos a seguir para realizar un tipo de estudio concreto. Las organizaciones como *AES* (Audio Engineering Society), *ITU* (International Telecommunication Union) o *EBU* (European Broadcasting Union) han publicado numerosos artículos en las últimas décadas relacionados con recomendaciones para establecer una serie de pautas en el diseño de estudios de grabación.

Respecto al diseño específico de salas de control hay dos recomendaciones importantes, una es la *ITU-R BS.1116-1* y *ITU-R BS.775-1*. Se refieren a las condiciones de escucha, como la forma de la habitación, las proporciones, el tiempo de reverberación y la disposición de los altavoces para obtener una buena escucha de referencia.

Hay que tener en cuenta que los documentos nombrados, no son más que recomendaciones y habrá que usarlos como tal, por lo que simplemente nos ayudarán a tomar cierto tipo de decisiones en el diseño.

Las condiciones acústicas en un estudio de grabación no dependen exclusivamente de la propia sala, sino también del sistema de reproducción y del técnico. Se van a indicar los valores recomendados de los parámetros acústicos que garantizan una calidad acústica mínima de la sala, basándonos en información recogida por estudios realizados y para los parámetros que no se disponga información.

A continuación, se definen los rangos recomendados para los distintos parámetros acústicos que van a servir en este trabajo para dar una valoración sobre la calidad del estudio de sonido.

- TR_{mid} (sala ocupada) = 0,2 – 0,4 segundos
- C50 (sala ocupada) > 2 dB
- C80 (sala ocupada) = entre 4 y 16 dB
- STI > 0,65

Una vez adquirido unos conocimientos previos de acústica de salas, se pueden crear pautas para el correcto diseño de estudios de grabación musical.

3.4.2 Salas de control

Para conseguir un correcto diseño de salas de control, a continuación, se dictan unas pautas a seguir.

1) Geometría y aislamiento previo.

2) Estudiar la mejor distribución de espacios posible en base a la geometría y las necesidades de aislamiento necesarias.

3) Proponer una solución de aislamiento óptima de cara a cumplir con la normativa de ruido de la zona y con el objetivo de tener un nivel de ruido en el interior del estudio de grabación de unos 15 dBA (NR15 o NC15). Según la recomendación de la *ITU-R BS.1116-1* el nivel de ruido de fondo medido en la zona de escucha a una altura de 1,2 m no deberá exceder la curva NR-10, o si no es posible, la NR-15.

4) Posicionar los altavoces en el interior de la sala de control y calcular en el punto óptimo de escucha dentro de un triángulo equilátero.

5) En este momento habrá que decidir cuál de las filosofías de diseño se adecuan más a nuestra sala y a nuestros requerimientos. Como norma general las salas pequeñas tendrán una mejor repuesta con un diseño Non-Environment ya que se eliminará las posibles influencias negativas de la sala en la escucha. No tenemos por qué elegir una filosofía concreta de diseño.

6) Una vez posicionados los altavoces deberemos calcular la geometría óptima de la sala para prevenir que nos lleguen primeras reflexiones al punto de escucha. Dicha geometría debería ser simétrica con respecto al eje central de la sala.

7) Además, deberemos seleccionar los materiales absorbentes o sistemas absorbentes necesarios para obtener un tiempo medio de reverberación en función del volumen de la sala.

$$Tm = 0{,}25 \cdot (\mathrm{V}/100)^{1/3} \tag{43}$$

8) Por otro lado, la respuesta en frecuencia que deberemos conseguir medida en los tercios de octava con un ruido rosa emitido por cada uno de los dos altavoces por separado y de conjuntamente deberá ser lo más plana posible.

9) De cara a evitar una imagen estéreo distorsionada por la llegada de reflexiones tardías se deberá conseguir que la respuesta temporal de la sala tal que no lleguen reflexiones antes de 20 ms de la llegada del sonido directo. Además, las reflexiones que nos lleguen después de 20 ms deberán ser difusas y con un nivel de -20 dB con respecto al sonido directo. En caso de poder conseguirlo se podrá reducir a 15 ms y -15 dB.

3.3.3 Salas de grabación

1) Escoger las dimensiones del recinto contenedor de manera que la distribución modal séalo más óptica posible.

2) Una vez conseguido el punto uno, diseñar la geometría del recinto persiguiendo evitar ecos o concentraciones sonoras en cualquier punto del recinto. Para ello se deberán angular las paredes con ángulos grandes entre 5º y 15º.

3) Proyectar la solución al aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impactos necesarios para que no exista ruido de inmisión del exterior y entre salas.

4) Una vez definido el aislamiento necesario para la sala de grabación definir los distintos sistemas absorbentes a emplear para conseguir una sala neutra. Será muy interesante el uso de sistemas de acústica variable de cara a tener una sala lo más polivalente posible.

5) El tiempo de reverberación objetivo de esta sala deberá ser, al menos, el doble que el de la sala de control debido a que es necesario que la reverberación de la sala de grabación pueda ser escuchada completamente en la sala de control.

4. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

4.1 Introducción

Este capítulo detalla el proceso de medición realizado en el estudio de grabación de la Escuela Politécnica. La metodología utilizada es en base a lo especificado en las normas UNE EN ISO. Estas normas recogen varias metodologías para medir el tiempo de reverberación y diversos parámetros acústicos. También se describe el equipamiento utilizado para la realización de las medidas.

Los valores obtenidos a partir de las medidas realizadas van a servir para valorar acústicamente el recinto y realizar una propuesta de mejora mediante validación previa del modelo virtual.

4.2 Equipamiento

El equipo de medida utilizado consta de los siguientes elementos:

- Programa de procesamiento y medición acústica dBBATTI32 del equipo 01 dB-Stell.
- Ordenador portátil
- Unidad de adquisición *SYMPHONIE* conectada al ordenador con tarjeta de sonido.
- Amplificador de potencia M700.

- Fuente de ruido omnidireccional dodecaédrica tipo DO12.

- Micrófono de condensador tipo lápiz.

- Cable extensible para la conexión a la unidad de adquisición.

A partir del ordenador junto con el software dBBatti32 se genera la señal de excitación que es emitida por la fuente. El micrófono se encarga de recoger la señal de excitación.

Esta señal es recogida por el ordenador, gracias a la tarjeta de sonido. Esta señal es procesada para su posterior análisis y obtención de los parámetros acústicos

Antes de realizar las medidas hay que comprobar que la relación señal a ruido sea la correcta. Si no se tiene suficiente nivel hay que aumentar el nivel de la señal mediante el amplificador, teniendo cuidado de que no se produzca saturación en el sistema.

Figura 37. Esquema de montaje para realizar las medidas.

4.3 Metodología

4.3.1 Métodos de medida

En las normas UNE EN ISO se describen dos métodos de medida: el método de la señal de ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada.

4.3.1.1 Método de la señal de ruido interrumpido

Con este método se obtienen grabaciones directas del nivel de presión sonora después de excitar un recinto con un ruido de banda ancha o ancho de banda limitado (ruido blanco o rosa).

La ventaja principal de este método es que no se necesita una instrumentación sofisticada, únicamente es necesario un micrófono con filtros que capte la señal y un registrador de caída.

Una de las principales desventajas es que no basta con realizar una única medida. Esto es debido a que el ruido que generamos en el recinto es aleatorio y se excitará de manera diferente en el tiempo.

4.3.1.2 Método de la respuesta impulsiva

En el método de la respuesta impulsiva se obtienen las curvas de decaimiento mediante la integración inversa de las respuestas impulsivas al cuadrado.

El comportamiento de una sala frente a un estimulo sonoro, cuando se excita con una señal impulsional, función delta o señal de duración muy breve de amplitud elevada, se denomina respuesta impulsional, h(t).

Una de las ventajas que presenta este método es que a partir de la respuesta impulsiva se pueden calcular múltiples parámetros además del tiempo de

reverberación. Estos parámetros pueden ser divididos en dos grandes grupos: monoaurales y biaurales.

4.3.2 Posiciones del equipo de medida

Las medidas acústicas adquiridas cumplen con las especificaciones de los estándares *ISO.*

La Universidad de Extremadura (UEx) tiene un acuerdo con AENOR para poder acceder a las normas *ISO* que se publican en España.

Se especifican las condiciones que se deben dar en la medición, así como los métodos, evaluación y presentación de los resultados.

Destacar que las mediciones se han realizado con las salas vacías de todo tipo de inmuebles o materiales que puedan influir en los resultados, tal y como se especifica en la normativa.

4.3.1.2.1 Ruido de fondo

Para la medición del ruido de fondo se procedió a la medición de una posición de micrófono en el centro de cada sala, durante un periodo de 15 minutos en cada una y así tener un valor más real.

4.3.1.2.2 Tiempo de Reverberación

Normativa UNE-EN_ISO_3382-2:2008." Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios".

Se ha optado por el método de precisión:

- Mínimo 12 combinaciones Fuente-Micro
- 2 posiciones de fuente
- 6 posiciones de micrófono para cada fuente
- Distancia micro-superficies (incluido suelo) como mínimo 1 metro
- Evitar posiciones simétricas en las posiciones de micrófonos
- Posición de micrófono no debe estar muy próxima a la posición de la fuente
- Distancia mínima Fuente-Micro $dmin = 2 \times \sqrt{\frac{V}{cxT}}$ = 0,82 metros
- Distancia fuente-superficies 1 metro

En recintos pequeños es conveniente que una posición de fuente se coloque en una esquina del recinto.

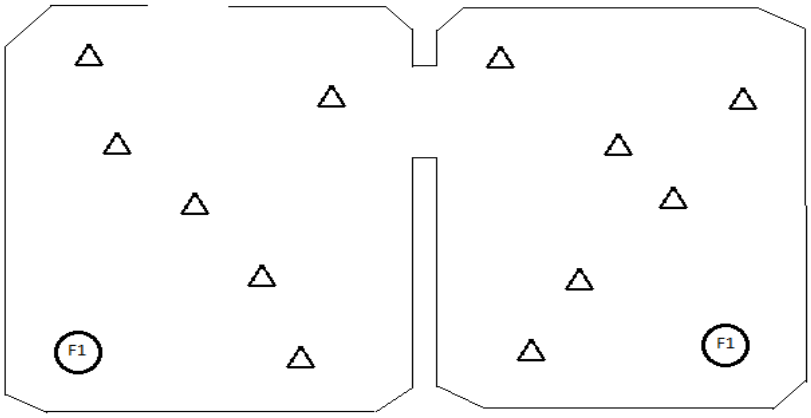


Figura 38. Puntos de medida para el cálculo del TR para la fuente 1

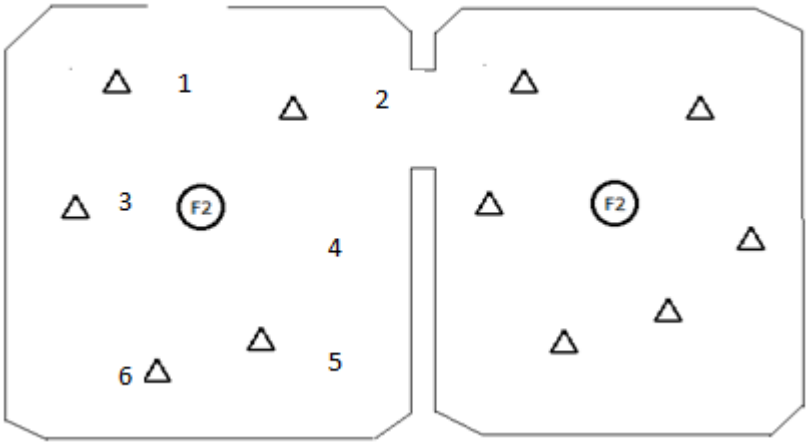


Figura 39. Puntos de medida para el cálculo del TR para la fuente 2.

4.3.1.2.3 Aislamiento a ruido aéreo

Normativa UNE-EN_ISO_16283-1:2015." Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo".

Esta parte de la Norma ISO 16283 especifica los procedimientos para determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos recintos en un edificio utilizando mediciones de presión acústica. Destinados a volúmenes de recintos entre 10 y 250 m^3. Los resultados de ensayo se pueden utilizar para cuantificar, evaluar y comparar el aislamiento acústico a ruido aéreo en recintos amueblados o vacíos donde el campo sonoro puede aproximarse o no a un campo difuso. El aislamiento acústico a ruido aéreo medido depende de la frecuencia y se puede transformar en un valor único que caracteriza el comportamiento acústico utilizando los procedimientos descritos en la norma ISO 717-1. *[Apartado 1 UNE-EN_ISO_16283-1].*

Para el procedimiento de las mediciones, se deben seguir las pautas dictadas por la normativa: [14]

- Distancia entre micrófonos 0,7 metros.
- Distancia micro-pared 0,5 metros.
- Distancia micro-Fuente 1 metro
- Distancia Fuente-Superficies 1 metro

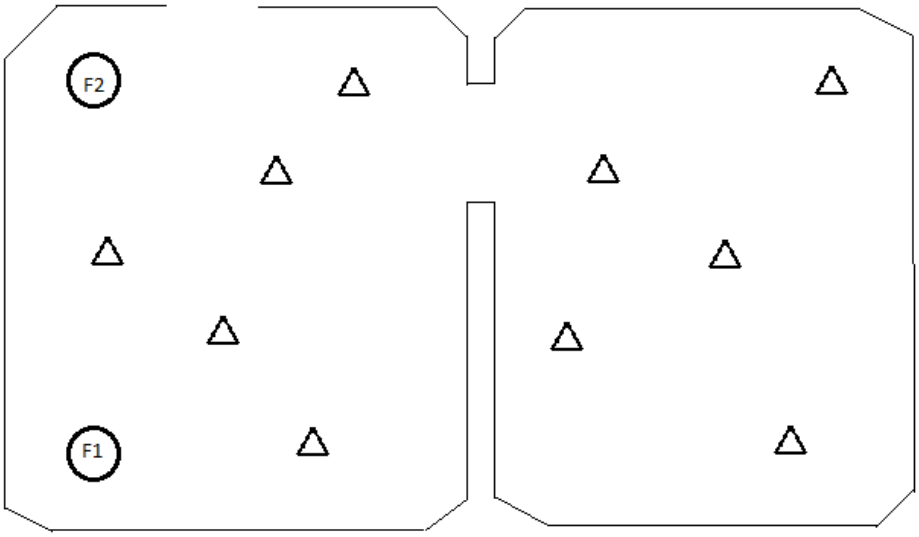


Figura 40. Posiciones Fuente-Micro para cálculo Ruido Aéreo tabique Salas.

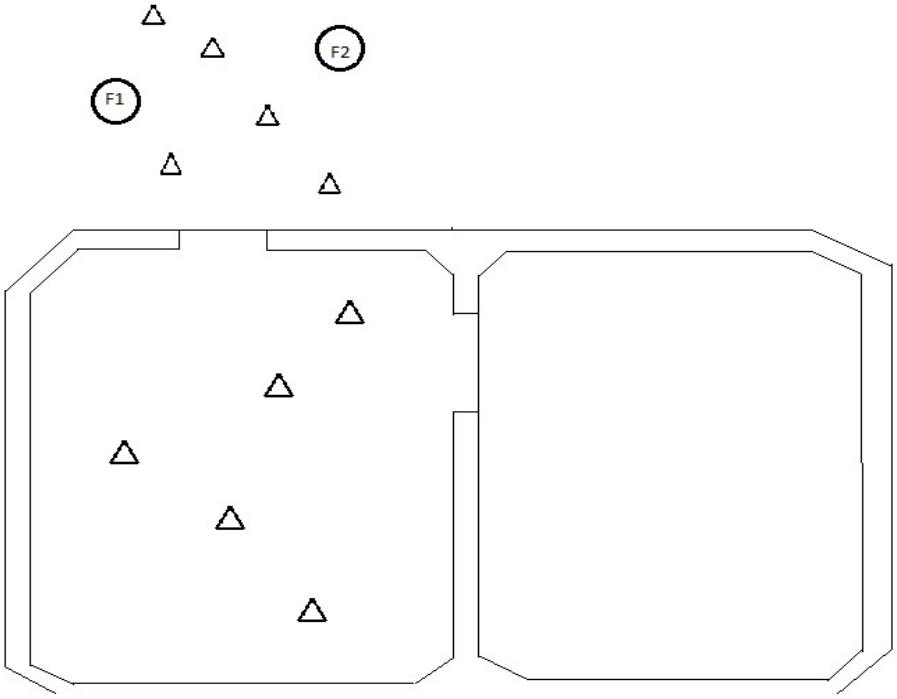


Figura 41. Posiciones Fuente-Micro para cálculo Ruido Aéreo tabique principal.

4.3.1.2.4 Aislamiento a ruido aéreo de fachada

Normativa UNE-EN_ISO_16283-3:2016. "Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en elementos de construcción. Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada".

Se medirá los niveles emitidos y recibidos en los recintos, así como el ruido de fondo y el tiempo de reverberación.

En la siguiente figura podemos ver el esquema para las posiciones de micrófono y fuente según nos indica la normativa. Para el nivel emitido se harán dos mediciones por cada posición de micrófono y para el nivel recibido tenemos cinco posiciones de micrófono repartidos por el recinto.

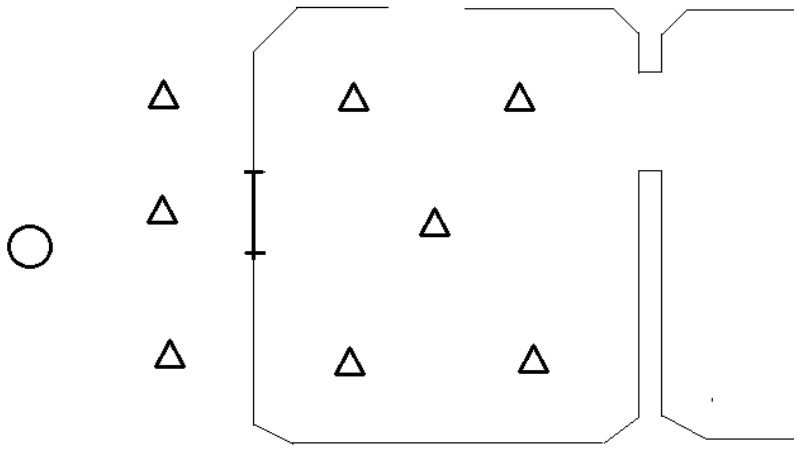


Figura 42. Posiciones Fuente-Micro para cálculo Ruido Aéreo en la Fachada.

4.3.1.2.5 Aislamiento a ruido de impactos

Normativa UNE-EN_ISO_16283-2:2016. "Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos".

Área del suelo del recinto emisor, m^2	Número de posiciones	Área del suelo del recinto receptor, m^2			
		≤50		> 50	
		Separación de tipo 1[a]	Separación de tipo 2[b]	Separación de tipo 1	Separación de tipo 2
< 20	Máquina de impactos	4	4	4	4
	Posiciones de micrófono fijo o de mano	4	4	8	8
	Posiciones de micrófono de movimiento continuo mecanizado o de barrido manual	1	1	2	2

Tabla 5. Posiciones máquina de impactos y micrófonos.

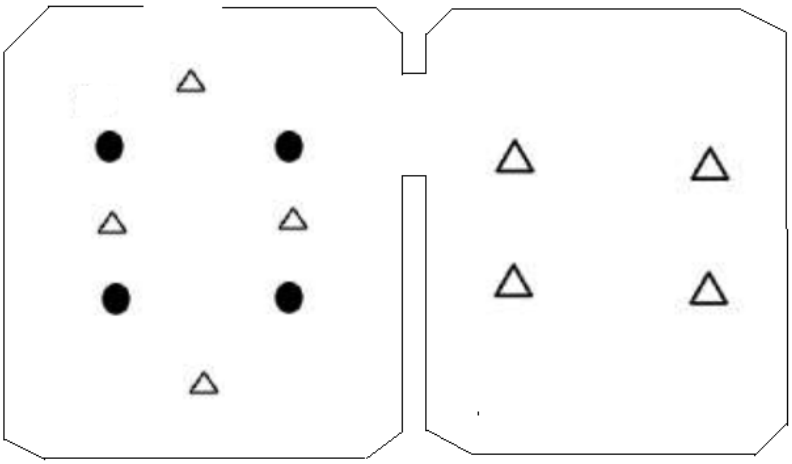


Figura 43. Posiciones Maquina de Impacto-Micro para cálculo a Ruido de Impactos.

5. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DEL RECINTO.

5.1 Información general del recinto.

5.1.1 Situación y consideraciones.

El estudio de grabación se encuentra ubicado en la localidad extremeña de Cáceres, concretamente en el interior de un sótano situado debajo del edificio de Telecomunicaciones de la Politécnica de Cáceres, Universidad de Extremadura. En la Figura 43 podemos ver un mapa aéreo de la zona concreta donde ha sido construido.

Figura 44. Vista aérea de la zona donde ha sido construido

Como vemos en la Figura 43, la puerta del sótano (marcada con una flecha roja) situada en el edificio de Telecomunicaciones (fachada amarilla) donde

estará ubicado el estudio de grabación se encuentra en un entorno donde habrá un evidente ruido debido al alto caudal de tráfico, ya que se trata de un centro universitario y además enfrente del estudio de grabación hay una zona de aparcamientos.

Otra de las causas por la que se tendrá máxima precaución en el diseño previo del aislamiento acústico será la cercanía de aulas donde se impartirán clases, ya que no sólo hay que preocuparse del ruido que entra en el estudio sino del que podemos generar al exterior y más si estamos en un entorno universitario.

También cabe destacar que anterior a la construcción del estudio de grabación, el sótano se utilizó para el desarrollo de un taller de carpintería con maquinarias tecnológicas como impresoras 3D. Por lo tanto, otro motivo por el cual deberemos tener cuidado en el diseño del aislamiento acústico y prevenir la contaminación del ruido exterior.

La ventaja de la ubicación del estudio en un centro universitario es que durante el resto del día que no se impartan clases y los fines de semana será un entorno donde los músicos y alumnos podrán experimentar esa paz y tranquilidad para poder grabar y producir música sin que el ruido exterior pueda ser molesta e interfiera en las grabaciones.

Es evidente que, en un recinto destinado a la grabación o reproducción sonora sea imprescindible disponer de un buen aislamiento acústico que permita que la grabación o reproducción no se vea contaminada con ruido exterior y al mismo tiempo, el sonido generado dentro de la sala no interfiera a los espacios colindantes.

5.1.2 Características de la construcción.

El espacio en desarrollo se utilizará para la creación y enseñanza musical, compuesta de tres salas, el estudio de grabación y control situado en la planta baja, y el aula donde se impartirán cursos de enseñanza en la primera planta justo encima del estudio de grabación.

En primer lugar, comentar que el sótano donde se ha construido el estudio de grabación está formado por paredes de bloques de hormigón, lo cual ayudará a cumplir las expectativas para el control de ruido. En la figura 44 podemos ver una vista desde el exterior.

Figura 45. Fachada del sótano donde se ha construido el estudio de grabación.

Como puede apreciarse en la fachada de la figura 44, la puerta de entrada al sótano ha sido sustituida por una puerta acústica con un buen sellado y así mejorar la protección frente al ruido del recinto. El estudio de grabación está situado a la

derecha y aprovechando el hueco existente en la parte izquierda se ha construido un baño que será necesario para las largas horas que se pasarán en él.

El diseño del estudio de grabación ha sido planificado con el fin de obtener la mayor calidad a un precio lo más económico posible y obtener el mejor rendimiento de aislamiento acústico. Para conseguir este fin se ha optado por un diseño de paredes de placas de yeso y suelo flotante cuyas características explicaremos posteriormente. Un ejemplo básico de construcciones de placas de yeso y suelos flotantes laminados se muestran en la Figura 45.

Figura 46. Instalación común de placas de yeso y suelo flotante.

La construcción de sistemas de placas de yeso laminado (PYL) está basada en la instalación de perfiles metálicos horizontales y verticales, por donde irá todo el sistema de cableado eléctrico y cuyas placas de yeso van atornilladas. Estos perfiles tienen una forma de “U” para insertar en ellos el aislante acústico, en nuestro caso, láminas de lana de roca. Los suelos flotantes laminados están formados por distintas capas, cada una diseñada para lograr un objetivo, son de fácil instalación y proporcionan una alta calidad de aislamiento a ruido de impactos. A continuación, se describirán cada uno de los sistemas por separado.

Una de las diferencias principales con su primo cercano, el parqué tradicional (adaptación recomendada del galicismo “parqué”), es que la tarima se instala “flotando” sobre una capa de aislante (espuma), de forma mucho más sencilla que los engorrosos sistemas de encolados, clavados o rastreles del parqué.

Por su parte, la tarima solo exige un suelo nivelado y seco para su instalación, y no hace falta hacer obras, picar suelo ni esperar un tiempo antes de su utilización, una vez puesta.

Además de ser mucho más económica, la tarima también es un suelo mucho más silencioso que el parqué, puesto que tiene una mayor capacidad de absorción de impactos.

La obra del estudio de grabación fue construida sobre un suelo base de gres formado por capa de cemento y baldosa. La primera fase de la construcción fue la instalación de la estructura horizontal de perfiles inferiores y superiores, fijados en el suelo y en vigas construidas sobre los pilares verticales del edificio de Telecomunicaciones. Entre los perfiles se coloca el aislante acústico y el sistema de cableado, finalmente se fijan los tabiques y el techo de placas de yeso laminado dejando los huecos correspondientes a las ventanas, puertas y cajas eléctricas que posteriormente serán instaladas.

Los tabiques frontales y laterales compuestos de capas de yeso laminado lindan a las paredes de hormigón del sótano formando un sistema de doble hoja mientras que la pared principal está diseñada con triple hoja de yeso laminado con su respectivo aislamiento y así reforzar el tabique que soporta el ruido proveniente del taller de carpintería.

Para conocer detalladamente el tipo de aislamiento acústico que contienen los tabiques, se ha diseñado el estudio mediante un programa de simulación [19]. En la figura 46, se muestra una vista de las capas que forman la pared principal que da entrada al estudio de grabación.

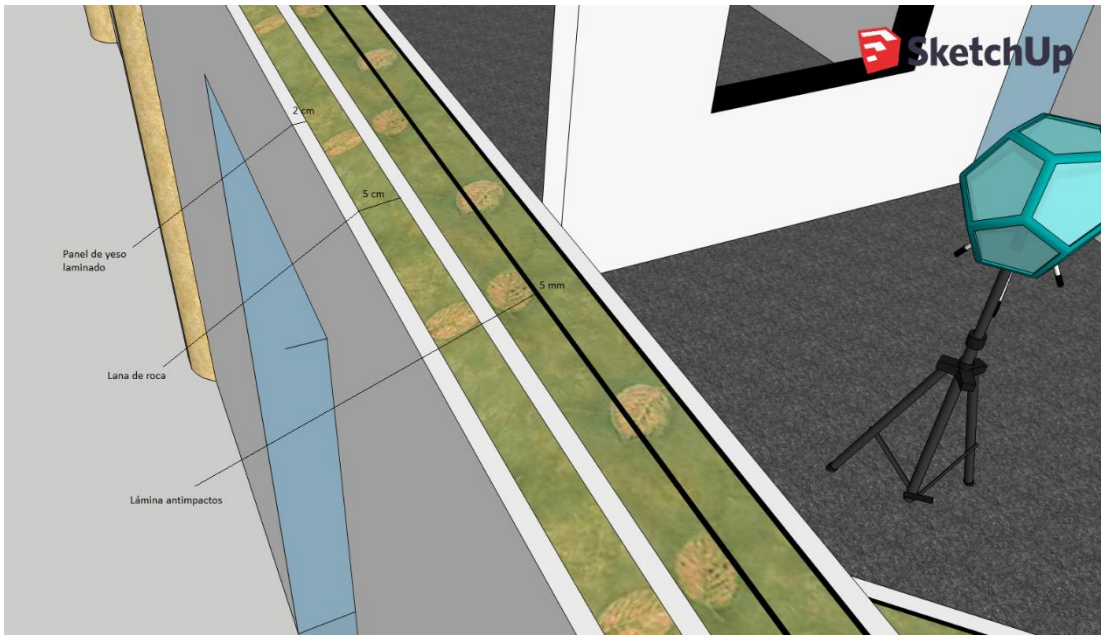


Figura 47. Detalle constructivo del tabique principal.

Como se ha mencionado, la pared principal expuesta a la mayor cantidad de ruido contiene tres capas de paneles de yeso laminado de unos veinte centímetros cada hoja, cada panel fijado a sus perfiles con respectivos aislantes de lana de roca cinco centímetros. Para evitar las vibraciones estructurales y puentes acústicos se han insertado láminas de neopreno tres milímetros. Con los aislantes mencionados conseguiremos una pérdida de transmisión del sonido en la banda de frecuencias bajas de un treinta por ciento y en frecuencias altas de hasta un ochenta por ciento.

Para minimizar las transmisiones de ruido aéreo y de impacto que se producen se ha diseñado un suelo flotante en el interior del estudio, mostrado en la figura 47, que ayudará a garantizar el cumplimiento de las exigencias del DB HR del CTE.

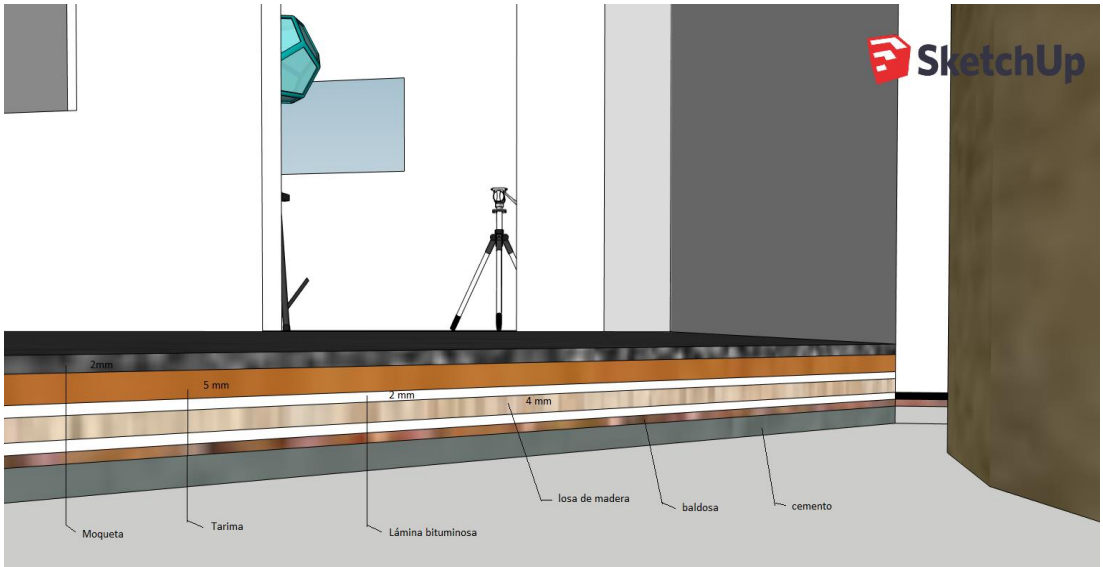


Figura 48. Detalle constructivo del suelo flotante.

En la Figura 47 podemos ver el suelo flotante compuesto por una capa laminar blanca bituminosa con propiedades anti-impacto que apoya directamente sobre el suelo base, la función de esta capa es evitar que la capa rígida entre en contacto directo con los elementos verticales (tabiques), una capa de losetas de madera de alta densidad impermeable que refuerza el aislamiento acústico seguido de otra capa anti-impacto y un suelo flotante de tarima de madera que constituye el acabado final del suelo. Posteriormente se instaló una moqueta sobre la tarima para mejorar el acondicionamiento acústico de las salas.

El techo se divide en dos partes, el de la sala de grabación tiene una forma geométrica distinta al de la sala de control para conseguir posteriormente unas acústicas específicas. La sala de control se diseñó para adquirir una filosofía de diseño LEDE, por lo cual queremos evitar las primeras reflexiones en la zona de escucha direccionándolas a la parte trasera. Esto se ha conseguido con un techo de altura creciente hacia la parte trasera. Para la sala de grabación se ha diseñado con

altura creciente hacia el centro para evitar las ondas estacionarias creadas por los modos propios de las superficies paralelas.

Las puertas instaladas que vemos en la figura 48, han sido diseñadas específicamente para estudios de sonido, suelen obtener calificaciones de reducción acústica de R_w = 45 dB. Son puertas pesadas metálicas formadas por un marco tubular de acero y una hoja de chapa de acero con varias capas de materiales aislantes y absorbentes en el interior.

Figura 49. Puertas metálicas instaladas.

Se han instalado dos ventanas acústicas en el interior del estudio mostradas en la figura 49. Ventanas compuestas por dos paneles de vidrio monolítico unidos.

Figura 50. Ventanas acústicas instaladas.

La imagen de la derecha muestra la ventana del tabique lateral de la sala de grabación, que junto con la ventana anteriormente instalada en la fachada del sótano, darán luz del exterior. La ventana de observación de la izquierda formada por dos capas de doble panel de vidrio de diferentes espesores unidas por un material absorbente da visión entre la sala de grabación y de control presenta una elevada resistencia a la penetración del sonido y consigue un aumento en el índice de reducción acústica, R_w.

5.1.3 Geometría y relación entre dimensiones.

En primer lugar, comentar que la geometría del estudio está limitada en ancho, largo y alto debido al espacio disponible en el sótano y a la posterior construcción del aula encima del estudio. De todas maneras, se ha conseguido que los espacios sean los más cómodos posibles y cumplan relaciones óptimas de cara a tener una buena distribución modal.

El recinto está dividido en sala de control y sala de grabación por un tabique de doble hoja de PYL y lana de roca compuesto por una ventana de observación y la puerta acústica. En la figura 50, podemos ver un plano en planta de la geometría que tiene el estudio.

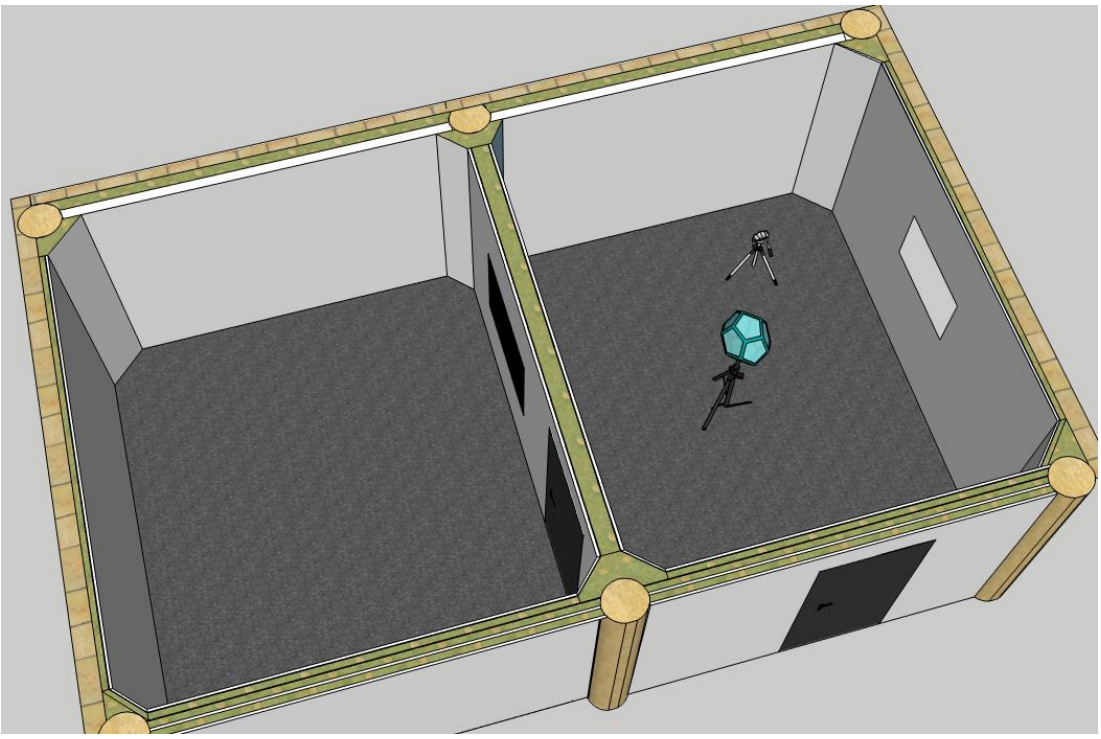


Figura 51. Vista en planta de la geometría del estudio de sonido. [19]

La geometría del recinto se ajusta a un diseño Non-Rectangular, evitando el paralelismo entre las superficies y disminuir el número de ondas estacionarias creadas por los modos propios de las superficies.

Para conocer el comportamiento de las salas utilizamos una herramienta online [20], desarrollada por un ingeniero de audio. Introducimos las dimensiones del recinto para comprobar donde se encuentra nuestro ratio dentro del diagrama de Bolt y ver cómo respondería al criterio de Bonello. Podremos visualizar las frecuencias de resonancia que se generarán dentro del recinto mediante una

distribución de las líneas modales para cada modo propio suponiendo que el recinto es un paralelepípedo.

Las dimensiones seleccionadas para la sala de control han sido (4 x 3,5 x 2,330) metros. En la figura 51, se puede ver como la relación de dimensiones para la sala de control se encuentra dentro del diagrama de Bolt.

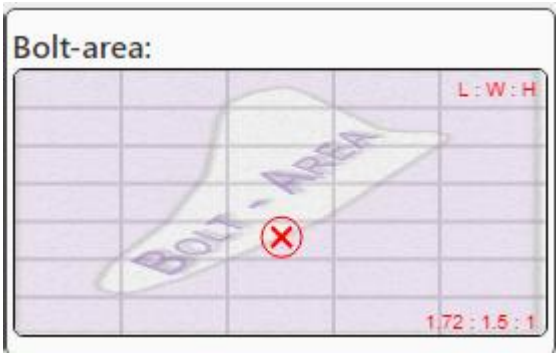


Figura 52. Diagrama de Bolt sala de control

Además, como se aprecia en la figura 52, cumplimos con el criterio de Bonello, produciéndose un aumento gradual de la densidad modal en cada banda de frecuencias.

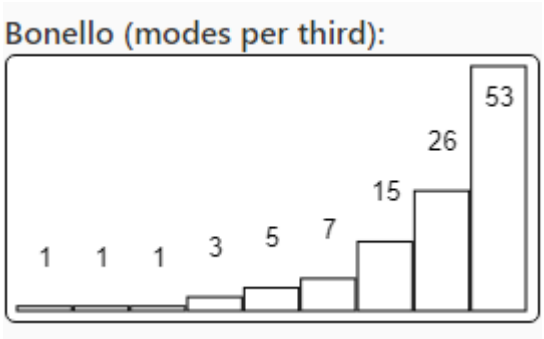


Figura 53. Criterio de Bonello de la sala de control

A continuación, en la figura 53, se representa en frecuencia las amplitudes de la densidad modal creada por las superficies de la sala de control.

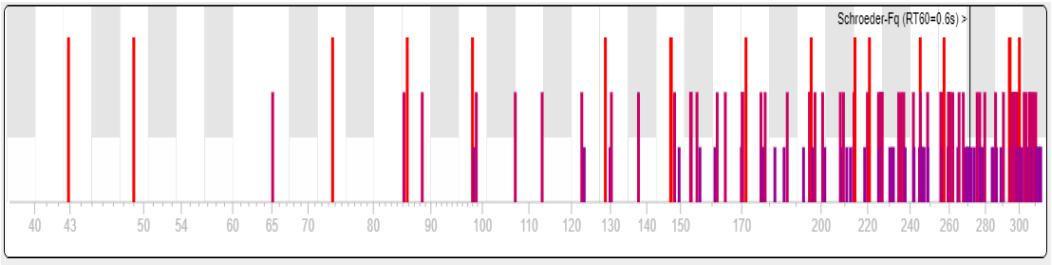


Figura 54. Densidad modal de la sala de control.

Como vemos en la figura 53, existen grandes diferencias de espaciado entre resonancias a frecuencias bajas lo cual provocará que la respuesta tonal de graves no sea todo lo estable o plana que nos gustaría. Sabiendo que este simulador representa las superficies cómo paralelas y la sala de control se ha diseñado para evitar este fin, conseguiremos reducir los espacios entre frecuencias resonantes especialmente los graves. De todas maneras, se intentará reducir este efecto colocando trampas de graves en lugares donde su presión sonora sea máxima, en las esquinas de la sala.

Por otro lado, se ha realizado el estudio de la distribución modal de la sala de grabación. Igualmente, al caso anterior, debido a que para realizar dicho estudio hay que aproximar la geometría del recinto a un paralelepípedo, nos situamos en el peor de los casos posibles. Las dimensiones finalmente se ajustan a (4 x 3,8 x 2,330) metros.

La distribución modal y el Criterio de Bonello serán las que vemos en las figuras siguientes. Como podremos apreciar, las dimensiones de este recinto no

serán las mejores ya que se asemejan unas a otras. Aunque la angulación de las esquinas ayudará a mejorar la distribución modal.

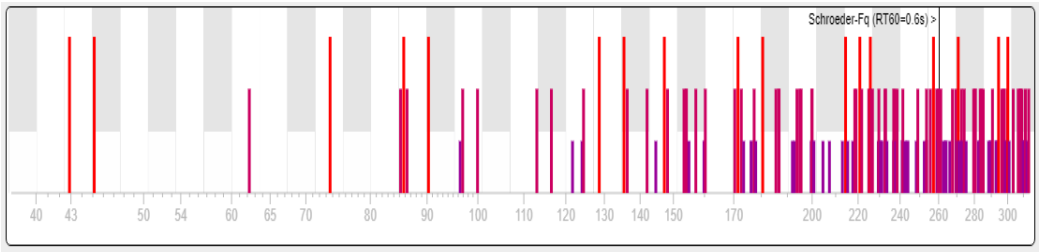


Figura 55. Distribución modal de la sala de grabación.

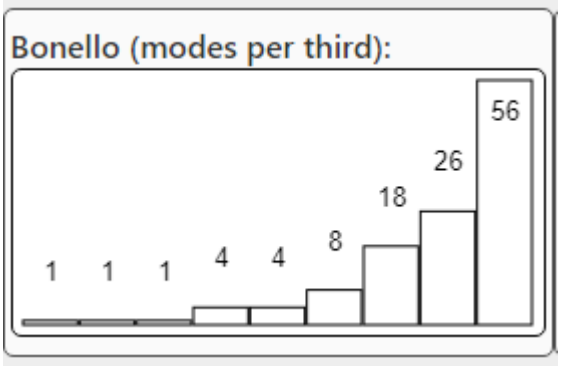


Figura 56. Criterio de Bonello para la sala de grabación.

Concluyendo, decir que las dimensiones que disponen la sala de grabación y control cumplen con el criterio de Bonello, aunque sea muy ajustado debido a las limitaciones geométricas del recinto. La falta de una alta densidad modal del espectro en frecuencias bajas, como era de esperar por las dimensiones de las salas, causará problemas en la eliminación de las ondas estacionarias provocadas por las superficies. De todas formas, gracias al diseño de las salas (angulación de esquinas y techo), se conseguirá la distorsión de éstas ondas.

5.2 Valoración del Aislamiento y Acondicionamiento acústico.

5.2.1 Introducción.

En este apartado se van a representar los resultados de los cálculos obtenidos en las medidas realizadas según los procedimientos, configuraciones y condiciones descritas para la valoración del aislamiento acústico de la construcción del estudio de sonido.

Los valores obtenidos a partir de las medidas realizadas van a servir para valorar acústicamente el recinto y realizar una validación del modelo virtual de la sala.

Según el apartado 2.0.4 de recitos y edificios destinados a espectáculos del DBHR, los recintos dedicados a la música serán objeto de estudio especial en cuanto al diseño acústico de la sala, pero en cuanto a la protección frente al ruido de otras unidades de uso, se consideran recintos de actividad con respeto a otros recintos protegidos y habitables de unidades de uso diferentes. [21]

Es importante destacar que los micrófonos utilizados para el registro, así como todo el resto de equipos no tienen verificación de calibración vigente, ya que son equipos utilizados para fines docentes en laboratorios universitarios, lo que provoca valores de incertidumbre en las medidas. Además, la fuente dodecaedro tiene altavoces de diámetro pequeño, lo que hace que la emisión del barrido por debajo de los 100 Hz no sea del todo fiable.

Por último, comentar que en este apartado solamente se han interpretado los resultados de las mediciones, es decir, las gráficas más representativas. El proceso de cálculo se puede encontrar en el Anexo B, síntesis de resultados en las medidas.

5.2.2 Ruido de fondo

5.2.2.1 Introducción

Es importante que el nivel de ruido de fondo en un estudio de grabación sea bajo. Este ruido puede proceder de estancias adyacentes del mismo edificio, de fuentes que se encuentren en el exterior o de las instalaciones del propio edificio.

Existen criterios de valoración de estudios de grabación en función de su nivel y espectro por lo que se han tomado medidas del nivel equivalente Leq del ruido de fondo de las salas. En este caso el criterio empleado ha sido en de las curvas NC (Noise Criteria) que es el más utilizado.

Para la valoración de ruido de fondo se han medido niveles en bandas de tercio de octava entre 20 Hz y 20 kHz, durante 15 minutos en una posición de micrófono centrado en cada sala.

Destacar que las medidas se hicieron por la mañana en día lectivo, por lo que nos pondremos en el peor de los casos, donde el nivel de ruido de fondo será máximo.

5.2.2.2 Resultados obtenidos

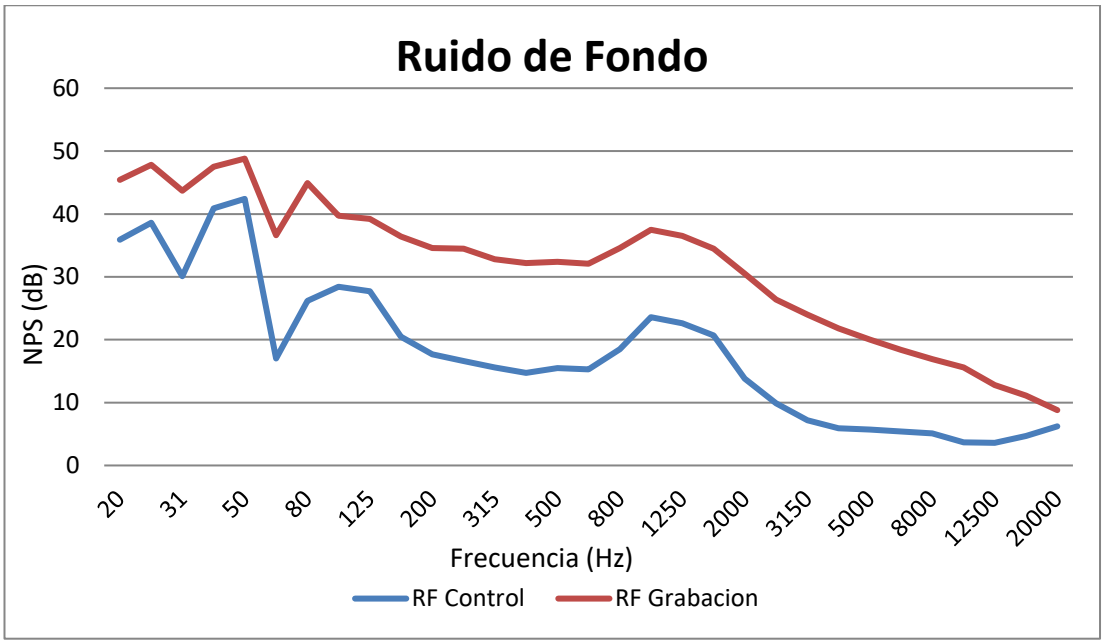


Figura 57. Gráfica de los valores medios del nivel equivalente de ruido de fondo medido.

En la siguiente gráfica se representa la curva promedio del ruido de fondo en las salas y las curvas de referencia NC-15, NC-20, NC-25, NC-30, NC-35. Para poder compararlas se representan los valores en bandas de octava.

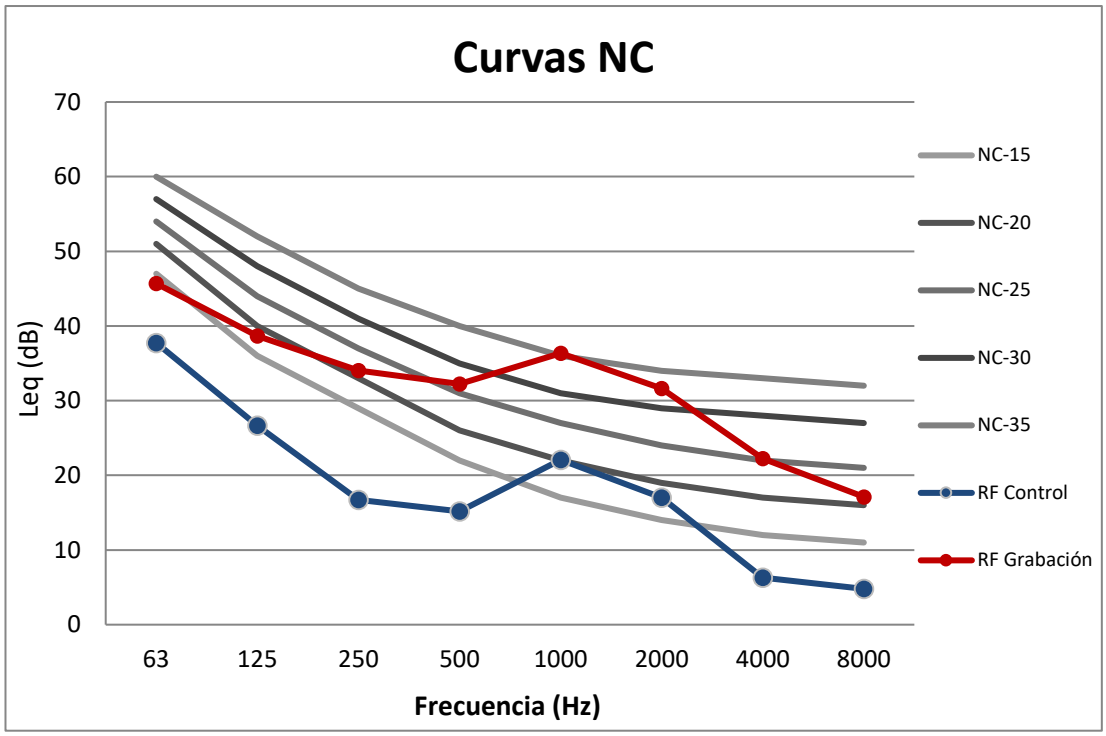


Figura 58. Representación de las curvas NC y el ruido de fondo equivalente en dB.

En la gráfica, destacar que el Leq de la sala de control se sitúa por debajo de la curva NC-15 en la mayor parte del rango de frecuencias, exceptuando dos valores de frecuencias medias (1 kHz y 2 kHz), que tienen un nivel de referencia NC-20. La sala de grabación con un NC-25 de media, alcanza un máximo NC-35 en la banda de frecuencias medias 1 y 2 kHz.

5.2.2.3 Conclusiones

En primer lugar, como se ha mencionado, el ruido de fondo fue medido en el peor de las condiciones, pues es el factor determinante por el cual no cumple con ls recomendaciones de este tipo de salas. Ya que como se menciona en la parte teórica, para salas dedicadas a la música, como estudios de grabación, se recomienda un valor NC-15.

Sin embargo, las medidas realizadas en la sala de control, sí cumple con los valores recomendados en la mayor parte de frecuencias, exceptuando las frecuencias medias de 1 y 2 kHz. Esto es debido, principalmente, a la dificultad de la reducción acústica en la transmisión del sonido a estas frecuencias, producido mayormente por el tráfico de automóviles.

A frecuencias bajas o graves, el criterio de ruido de fondo es menos restrictivo debido a la sensibilidad del oído a dichas frecuencias, por lo tanto, resulta más fácil cumplir con las recomendaciones en este tipo de recintos.

A frecuencias altas, a medida que aumenta la frecuencia, el ruido de fondo va disminuyendo. Esto es debido principalmente al aumento del aislamiento acústico a estas frecuencias, provocado por las características de absorción de la lana de roca instalada en el interior del sistema de paneles de yeso laminado.

Finalmente, se puede decir que las salas de grabación y control no cumplen con las recomendaciones del criterio de ruido establecido por normativas específicas de estudios de grabación, explicados en la tabla 1, debido a los altos valores en la banda de frecuencias medias. Con un NC-35 en la sala de grabación y un NC-20 en la sala de control. Por lo tanto, una propuesta de mejora podría ser el diseño constructivo de aislamiento en esta banda de frecuencias problemáticas y así disminuir los valores de ruido de fondo, consiguiendo un NC-15. Para conseguir este aumento de aislamiento acústico, se podría agregar más capas de yeso laminado, aunque reduciría las dimensiones geométricas del estudio de grabación.

5.2.3 Tiempo de Reverberación.

Para la determinación del tiempo de reverberación se utilizará una excitación de la fuente, señal interrumpida de ruido rosa en todas las bandas frecuencia. Una vez apagada la fuente se determina el tiempo que transcurre el nivel de la señal en caer 60 decibelios.

Tal como nos indica la Normativa ISO 3382, los tiempos de reverberación se representan en forma de gráficos y con valores en una tabla, correspondientes a cada punto de medida con cada fuente, para cada banda de frecuencia.

A continuación, se presentan los valores globales del tiempo de reverberación para las dos salas del estudio de sonido, en bandas de tercio de octava con cada posición de fuente (de 50 Hz a 20KHz) para cada punto de medida.

5.2.3.1 Sala de Grabación.

A continuación, se representa gráficamente en la figura siguiente el valor global del tiempo de reverberación obtenido mediante las medidas realizadas en la sala de grabación.

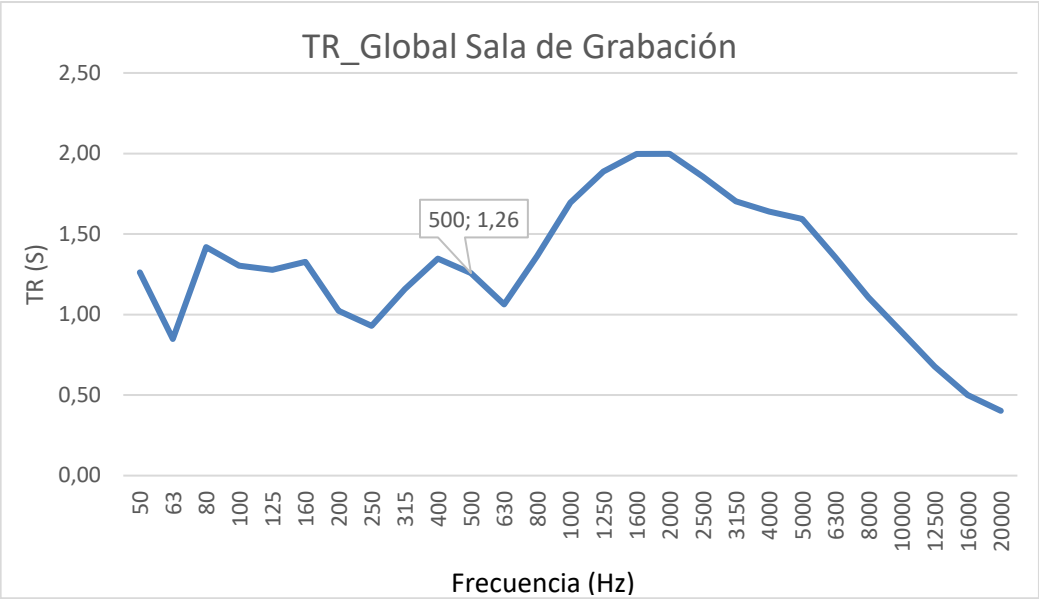


Figura 59. Gráfica del TR total de la sala de grabación por cada banda de frecuencias.

5.2.3.2 Sala de control.

Se representa gráficamente en la figura siguiente el valor global del tiempo de reverberación obtenido mediante las medidas realizadas en la sala de control.

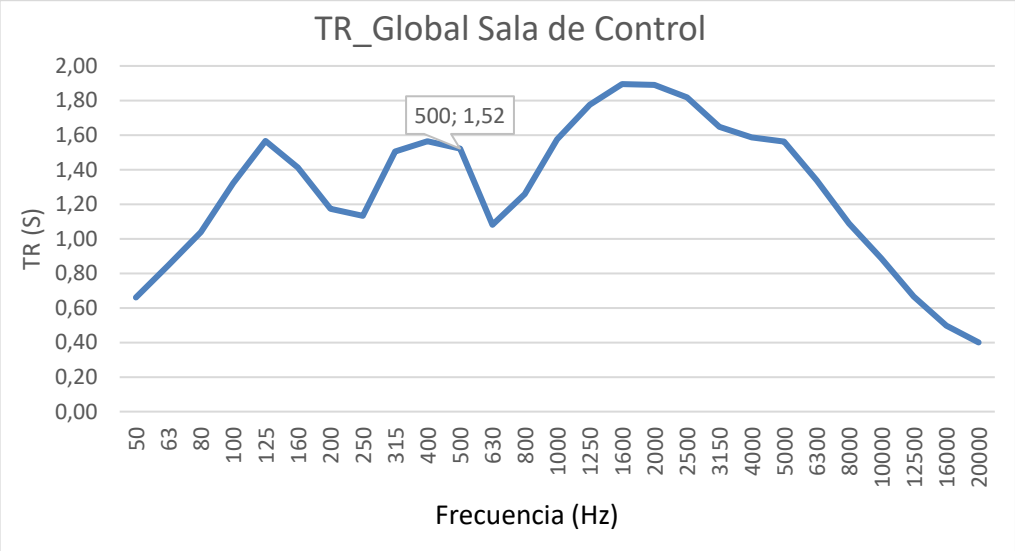


Figura 60. Gráfica del TR total de la sala de control por cada banda de frecuencias.

5.2.3.3 Conclusiones

Como se puede observar en la siguiente figura, la dispersión de los valores en bajas frecuencias es muy elevada llegando a valores de desviación de 0,5 segundos. Por debajo de 100 Hz los valores no son fiables debido a la falta de precisión de las medidas por parte del equipo de medida, empezando por la fuente y pasando por todo el sistema utilizado.

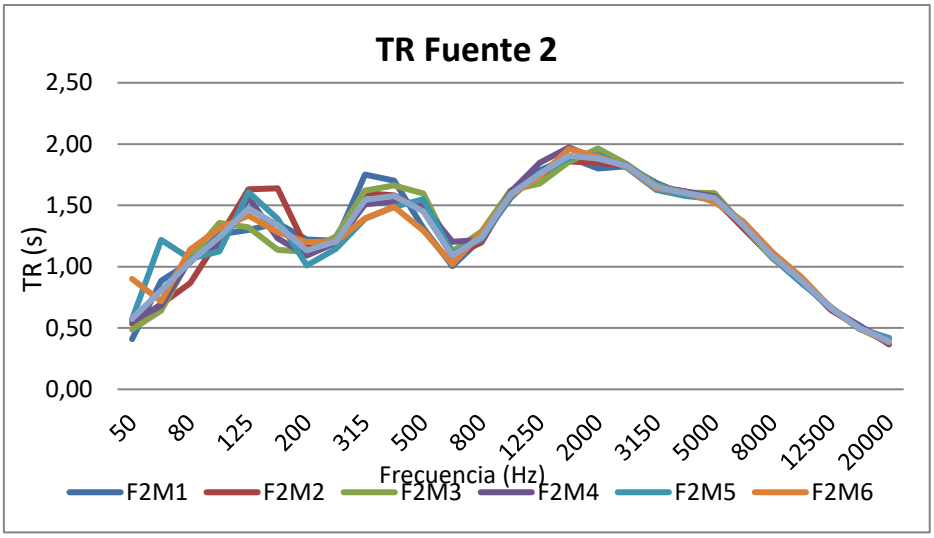


Figura 61. Gráfica del tiempo de reverberación recibido en las posiciones de micrófono

Teniendo en cuenta que las mediciones según dicta la normativa se calculan con la sala vacía, el tiempo de reverberación en frecuencias bajas debería ser menor que en frecuencias medias y altas [2]. En el estudio de sonido, en bajas frecuencias los valores del TR promedio son menores que a frecuencias medias. En altas frecuencias, se observa a partir de la banda de los 2000 Hz una caída del TR desde valores de 1,6 s a 0,4 s.

Las salas de grabación y control, tienen un volumen de 35,7m³ y 31,5m³ respectivamente, con un TR medio de 1,29 s para la sala en vacío. En salas de

estudio de sonido se recomienda tener un tiempo de reverberación uniforme en todo el rango de frecuencias de aproximadamente 0,25 y 0,50 segundos.

En las simulaciones realizadas con Catt-Acoustic en el modelo virtual se introducirá acondicionamiento acústico para solventar la bajada del tiempo de reverberación.

5.2.4 Aislamiento a ruido aéreo entre recintos interiores.

En este apartado, se estudiará el comportamiento acústico de los elementos de separación vertical, en concreto, el aislamiento a ruido aéreo de recintos interiores.

En primer lugar, se valorará el comportamiento del tabique que separa las salas de control y grabación. A continuación, se estudiará el comportamiento acústico de la medianera que separa el estudio de las salas de máquinas.

Para valorar el aislamiento a ruido aéreo entre recintos, vamos a determinar si los resultados obtenidos cumplen con las exigencias del documento básico de protección frente al ruido DB-HR del CTE y representaremos los resultados gráficamente según dicta el anexo B de la normativa ISO 16283-1 de aislamiento a ruido aéreo en edificios.

5.2.4.1 Aislamiento entre sala de grabación y control.

Figura 62. Tabique separador entre salas.

5.2.4.1.1 Informe del ensayo. [14]

En este ensayo se ha medido in situ el aislamiento a ruido aéreo éntrela sala de grabación y control. La pared separadora contiene elementos constructivos mixtos (puerta, ventana acústica y el tabique de PYL) que serán medidos *in situ* y comparados con los valores en laboratorio.

Teniendo en cuenta las indicaciones de la norma ISO 16283-1, se han tomado dos posiciones de fuentes en el recinto emisor y para cada una de estas, se

han elegido cinco posiciones de micrófono tanto en el recinto emisor como en el receptor.

El ensayo se ha realizado el 03/05/2018 a las 11:00h. El área total de separación común es de 9,32 m², ventana acústica de 1,1 m² y una puerta de 1,8 m². El volumen del recinto receptor (sala de control) es de 31,7m³.

En la siguiente figura se muestra el esquema de las posiciones fuente y micrófono utilizados:

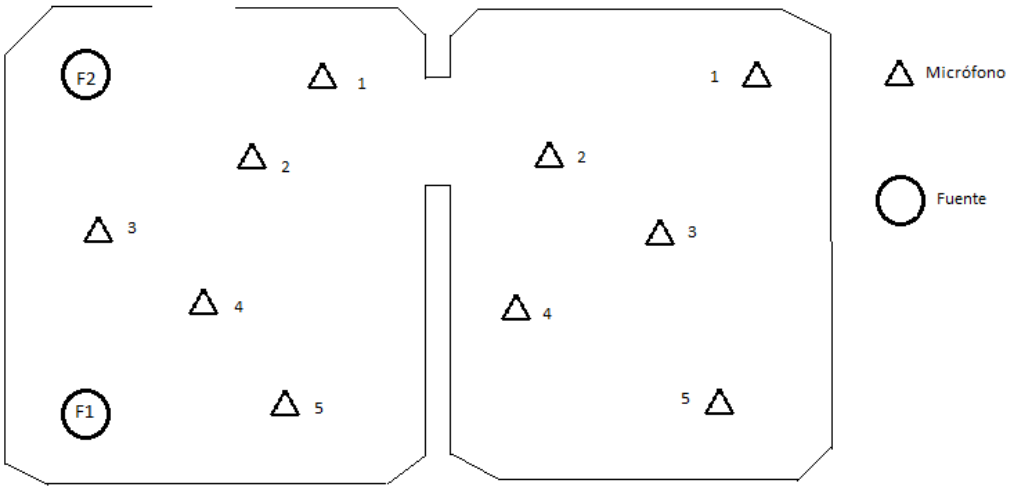


Figura 63. Esquema de posiciones de fuentes y micrófonos.

5.2.4.1.2 Interpretación de los resultados.

En este caso, al ser recintos dedicados a la música y de la misma unidad de uso, no tendremos que cumplir con las exigencias del DB-HR. Por lo tanto, se representan simplemente los datos obtenidos del aislamiento acústico y la comparación de los valores de reducción acústica de los elementos constructivos medidos in situ con las características aportadas por los fabricantes en laboratorio.

Para la representación de los valores obtenidos se utilizarán las plantillas del registro de resultados de acuerdo al anexo B de la Norma ISO 16283-1.

Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos.

Diferencia de niveles estandarizada medida de acuerdo con la Norma ISO 16283-1

Área de separación común: 9,32 m²

Volumen del recinto emisor: 35,7 m³

Volumen del recinto receptor: 31,7 m³

Clasificación de acuerdo a la norma ISO 717-1:

$\mathbf{D_{nT,\,w}}$ **(C;Ctr)** = 34 (0;-1) dB

$\mathbf{C_{50\text{-}3150}}$ = 0 dB $\mathbf{C_{50\text{-}5000}}$ **=** 0 dB $\mathbf{C_{100\text{-}5000}}$ **=** 1 dB

$\mathbf{C_{tr50\text{-}3150}}$ = -2 dB $\mathbf{C_{tr50\text{-}5000}}$ = -2 dB $\mathbf{Ctr_{100\text{-}5000}}$ **= -**1 dB

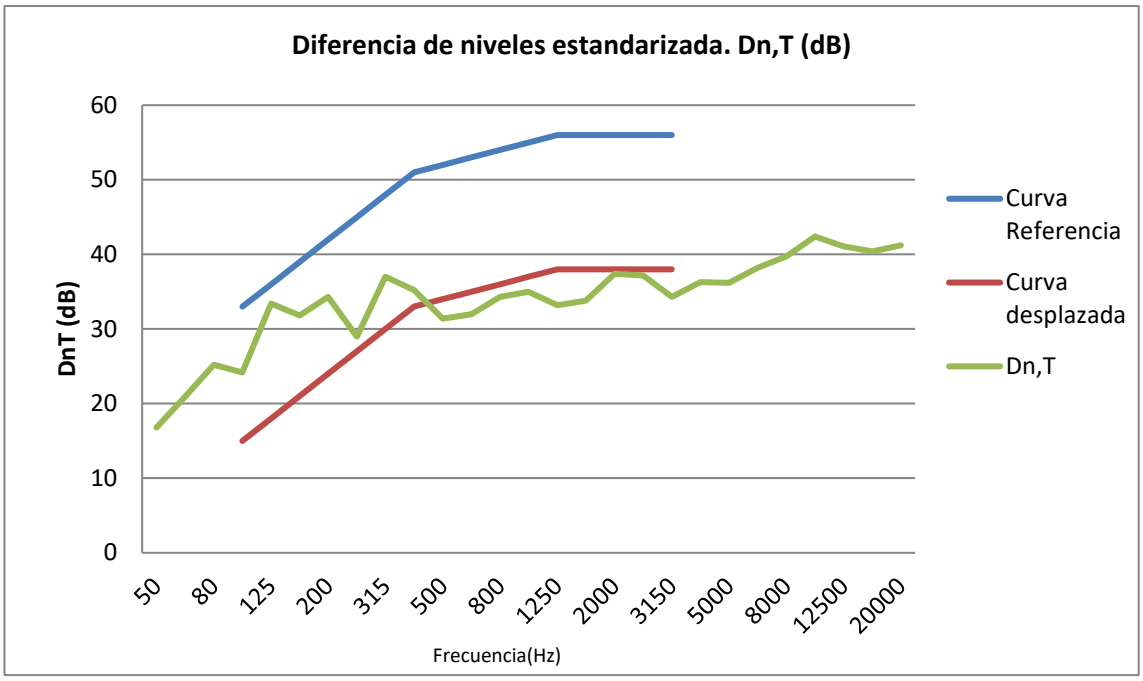


Figura 64. Gráfica de la diferencia de niveles estandarizada global.

Para interpretar los resultados del aislamiento acústico del tabique, en primer lugar y de forma general, se pueden observar picos provocados por los modos propios y las vibraciones estructurales del recinto en las frecuencias fundamentales y sus múltiplos. Estos picos serán menos exagerados a frecuencias medias, debido a las características de transmisión de los materiales que forman el tabique.

En frecuencias bajas o graves puede observarse menor aislamiento acústico, debido a que las estructuras son más sensibles a vibraciones en estas frecuencias y, por lo tanto, se obtienen menores pérdidas de transmisión.

A frecuencias medias y altas, se observa un aumento en el aislamiento acústico. Esto es debido principalmente a las características de pérdidas de transmisión global de los elementos que forman el tabique de separación vertical

Índice de reducción acústica de la ventana acústica de acuerdo con la Norma ISO 16283-1.

Área de separación común: 1,1 m²

Volumen del recinto emisor: 35,7 m²

Volumen del recinto receptor: 31,7 m²

Clasificación de acuerdo a la norma ISO 717-1:

R_w (C;Ctr) = 25 (-1;-1) dB

$C_{50-3150}$ = -1 dB **$C_{50-5000}$ =** 0 dB **$C_{100-5000}$ =** 0 dB

$C_{tr50-3150}$ = -2 dB **$C_{tr50-5000}$** = -2 dB **$Ctr_{100-5000}$ = -**1 dB

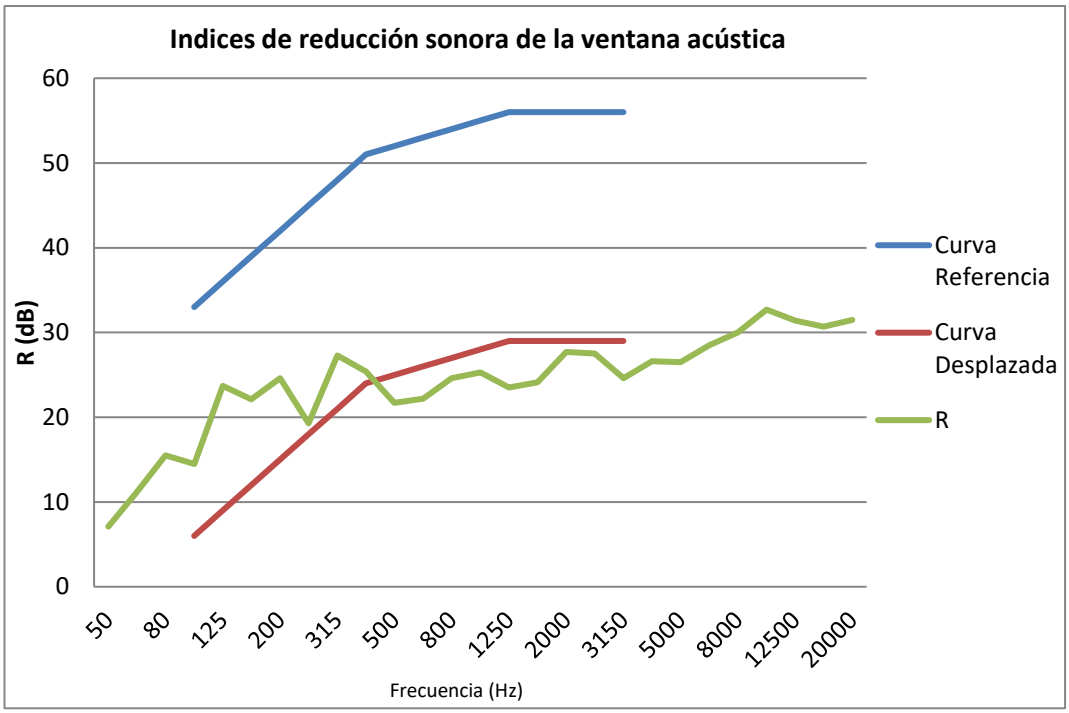


Figura 65. Gráfica del índice de reducción sonora, de la ventana acústica.

Se ha interpretado el índice de reducción acústica del elemento más débil para así verificar que el aislamiento acústico global entre recintos con elementos constructivos mixtos no será mayor a 10 dB con respecto al valor del elemento constructivo más débil que lo compone. Como se puede ver teniendo un valor de reducción sonora ponderada de Rw=25 dB para la ventana acústica, el aislamiento acústico global de toda la separación común es de 34 dB.

Hay que tener en cuenta que los datos obtenidos del aislamiento acústico final de obra (al que hace referencia el DB HR), defiere del valor obtenido en laboratorio (al que hace referencia la NBE CA 88). Esto se debe a que, en obra, la transmisión de ruido entre dos recintos (o desde el exterior) se produce por vías directas e indirectas (flancos).

Además de las transmisiones por vías indirectas, existen otros motivos por los cuales el aislamiento puede ser menor que el proporcionado por el mismo en laboratorio. Estos motivos pueden ser por defectos en la ejecución como falta de estanquidad y existencia de puentes acústicos.

Por lo tanto, para un mismo elemento constructivo, el aislamiento obtenido in situ siempre será menor que el aislamiento teórico o de laboratorio.

5.2.4.2 Aislamiento de la pared principal.

Figura 66. Tabique principal de entrada al estudio de grabación.

5.2.4.2.1 Informe del Ensayo.

El ensayo se ha realizado el 03/05/2018 a las 12:00h. El área de separación común es de 8,054 m² y el volumen del recinto receptor es de 35,7m³.

En este ensayo se medirá in situ el aislamiento acústico, en concreto, el aislamiento del tabique de la pared separadora entre la entrada del sótano (Hall) y la sala de grabación, pertenecientes a distintas unidades de uso, dicha pared contiene una puerta acústica. Se han tomado dos posiciones de fuentes en el recinto emisor y para cada una de estas posiciones se han elegido 5 posiciones de micrófono tanto en el recinto emisor como en el receptor, teniendo en cuenta las exigencias de la norma ISO 16283-1.

En la siguiente figura se muestra el esquema de las posiciones fuente y micrófono utilizados:

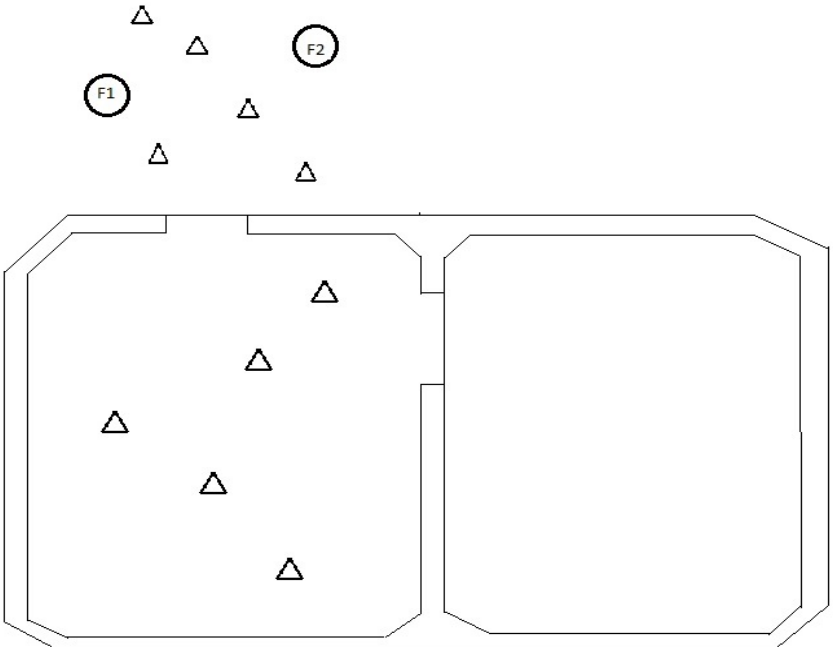


Figura 67. Esquema de posiciones de fuentes y micrófonos.

5.2.4.2.2 Interpretación de los resultados.

Para recintos dedicados a la música, la protección frente al ruido entre recintos de distintas unidades de uso, como ocurre en este caso, la sala de grabación se considera recinto de actividad respecto a otro recinto protegido o habitable para así poder ser valorados según las exigencias del documento básico DB-HR del CTE.

Para valorar el aislamiento acústico a ruido aéreo del ESV, vamos a determinar si los resultados obtenidos cumplen con las exigencias de protección frente al ruido y representaremos los resultados gráficamente según dicta el anexo B de la normativa ISO 16283-1 de aislamiento a ruido aéreo en edificios.

La exigencia de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos $D_{nT,\ A}$, en caso de elementos de separación vertical con puertas y/o ventanas entre un recinto habitable y un recinto de actividad, se sustituye por valores del índice global de reducción acústica, R_A, del elemento separador vertical entre los dos recintos, es decir, se sustituye por una exigencia de aislamiento de elemento constructivos.

El punto 2.1.1.b.III de la guía de aplicación del DB-HR, dicta las exigencias que se deben cumplir entre un recinto habitable y un recinto de actividad colindante vertical u horizontalmente con él. Cuando compartan puertas, el índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A, de éstas, no será menor que 30 dBA y el índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A, del cerramiento no será menor que 45 dBA.

Por lo que se puede deducir que el cerramiento que divide la sala de grabación y el hall de entrada al sótano, no cumple con las exigencias de protección

frente al ruido. Esto es debido principalmente a la baja densidad estructural del sistema de PYL, una ampliación de capas de PYL en las estructuras verticales obteniendo mayor densidad, provocaría una dificultad de transmisión del sonido por vías directas y por flancos.

Las mediciones in situ del aislamiento acústico de la puerta como se podía esperar son inferiores a valores medidos en laboratorio aportados por los fabricantes. Aun así, se aproxima al valor mínimo recomendado por el DBHR. Como se ha explicado en el apartado anterior, los valores de aislamiento acústico de elementos constructivos como puertas y ventanas acústicas medidos in situ serán inferiores que los especificados por los fabricantes medidos en laboratorios.

A continuación, se representan los resultados obtenidos gráficamente con las plantillas de registro de datos según indica el anexo B de la norma ISO 16283-1, aislamiento acústico a ruido aéreo.

Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos.

Diferencia de niveles estandarizada medida de acuerdo con la Norma ISO 16283-1

Área de separación común: 8,054 m^2

Volumen del recinto emisor: 85,5 m^3

Volumen del recinto receptor: 35,7 m^3

Clasificación de acuerdo a la norma ISO 717-1:

$D_{nT,w}$ (C;Ctr) = 36 (-1;-1) dB

$C_{50-3150}$ = -1 dB **$C_{50-5000}$** = 0 dB **$C_{100-5000}$** = 0 dB

$Ctr_{50-3150}$ = -2 dB **$Ctr_{50-5000}$** = -2 dB **$Ctr_{100-5000}$** = -1 dB

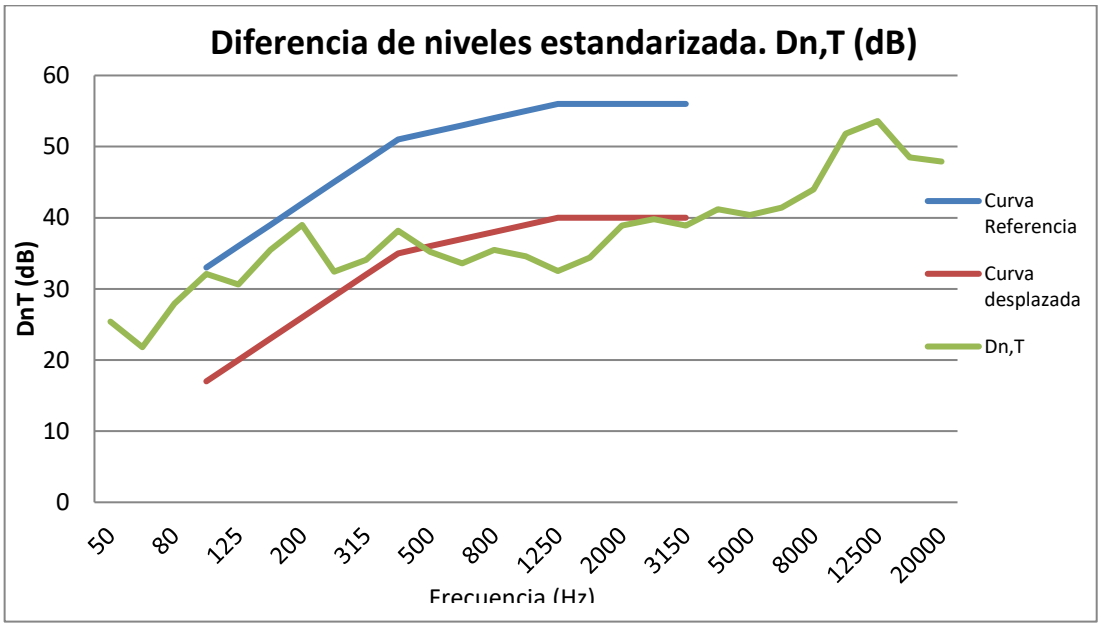


Figura 68. Gráfica de la diferencia de niveles estandarizada global.

Para interpretar los resultados del aislamiento acústico del tabique, en primer lugar y de forma general, se pueden observar picos provocados por los modos propios y las vibraciones estructurales del recinto en las frecuencias fundamentales y sus múltiplos. Estos picos serán menos exagerados a frecuencias medias, debido a las características de transmisión de los materiales que forman el tabique.

En frecuencias bajas o graves puede observarse menor aislamiento acústico, debido a que las estructuras son más sensibles a vibraciones en estas frecuencias y, por lo tanto, se obtienen menores pérdidas de transmisión.

A frecuencias medias y altas, se observa un aumento en el aislamiento acústico. Esto es debido principalmente a las características de pérdidas de transmisión global de los elementos que forman el tabique de separación vertical

Índice de reducción acústica de la puerta acústica de acuerdo con la Norma ISO 16283-1

Área de separación común: 1,8 m²

Volumen del recinto emisor: 85,5 m³

Volumen del recinto receptor: 35,7 m³

Clasificación de acuerdo a la norma ISO 717-1:

R_w (C;Ctr) = 28 (-1;-1) dB

$C_{50-3150}$ = -1 dB **$C_{50-5000}$ =** 0 dB **$C_{100-5000}$ =** 0 dB

$C_{tr50-3150}$ = -2 dB **$C_{tr50-5000}$** = -2 dB **$Ctr_{100-5000}$ = -**1 dB

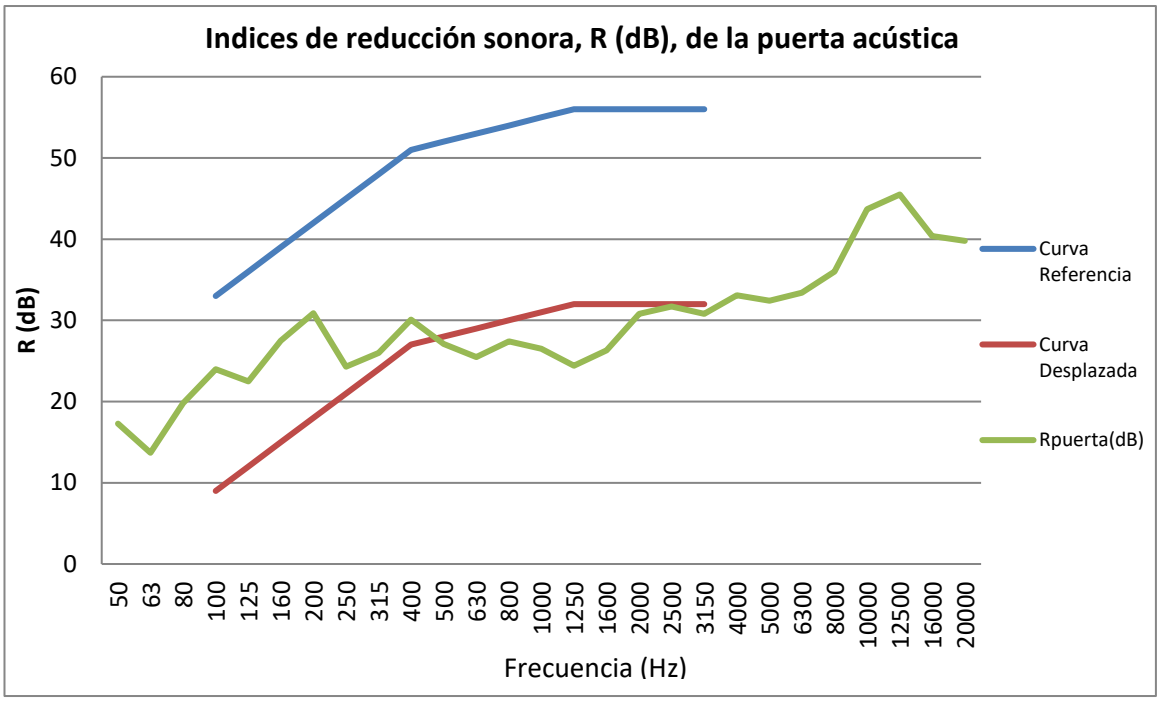


Figura 69. Gráfica del índice global de reducción acústica, R (dB), de la puerta acústica.

Como se ya se ha comentado, podemos ver un aumento general en el aislamiento acústico respecto al tabique interior del apartado anterior.

Vemos un aumento del aislamiento acústico con la frecuencia debido a la dificultad de las estructuras de PYL a frecuencias graves en retener la transmisión del sonido. A partir de las frecuencias medias, se consigue mayor pérdida de transmisión del sonido debido a las características absorbentes y estructurales de los materiales que componen el tabique.

5.2.5 Aislamiento a ruido Aéreo de fachada.

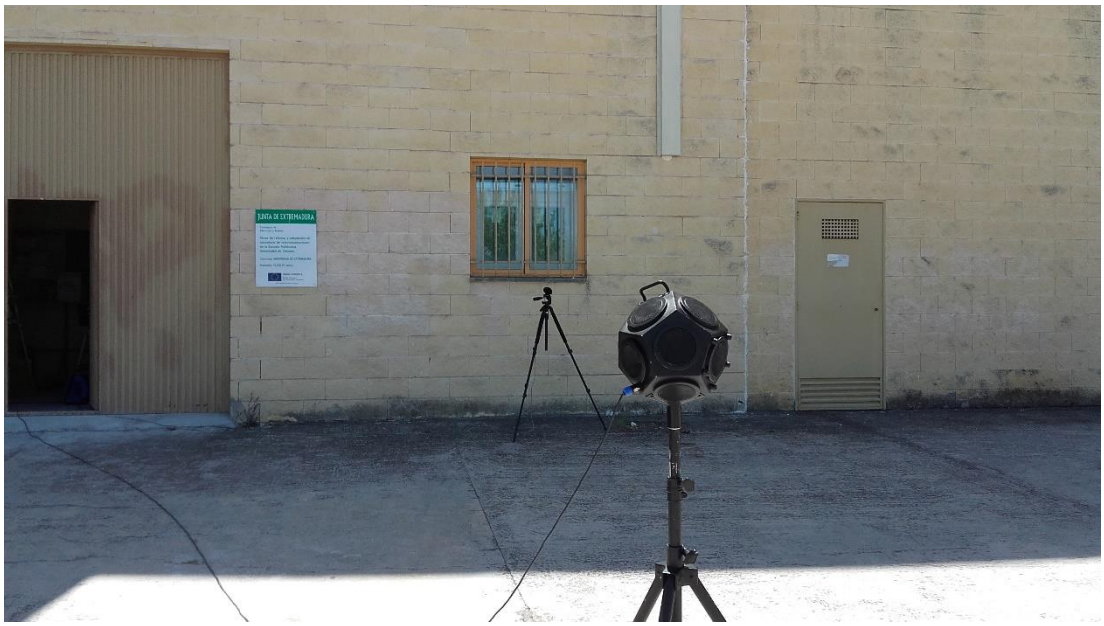


Figura 70. Aislamiento a ruido aéreo en fachadas.

5.2.5.1 Informe del Ensayo.

El ensayo se ha realizado el 03/05/2018 a las 13:00h. El área de separación común es de 9 m² y el volumen del recinto receptor es de 35,7m³.

En este ensayo se medirá in situ el aislamiento acústico, en concreto, el asilamiento a ruido aéreo de la fachada que separa el exterior y la sala de grabación. Esta pared está compuesta por el tabique exterior de bloques de hormigón, en el interior del recinto receptor la hoja de paneles de yeso laminado, en el espacio de aire cubierto por aislante de lana de roca y por último una ventana acústica. Se seguirán las recomendaciones, teniendo en cuenta las exigencias de la norma UNE_EN ISO 16283-3.

En la siguiente figura se muestra el esquema de las posiciones fuente y micrófono utilizados:

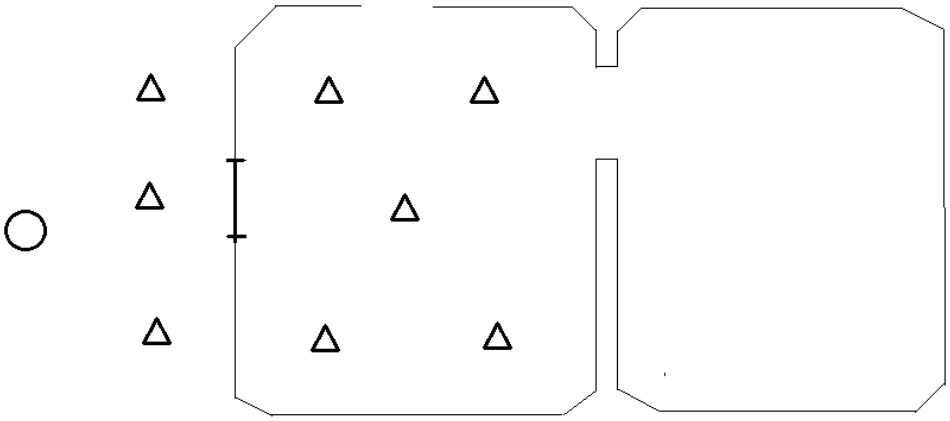


Figura 71. Esquema de posiciones de fuentes y micrófonos.

Según el apartado 9.4 de la norma ISO 16823-3 para la posición de la fuente, la distancia hacia el centro de la muestra de ensayo debe ser al menos 5 m para el método por elementos con altavoz y al menos 7 m para el método global con altavoz. Se debe utilizar un mínimo de tres y un máximo de diez posiciones de micrófono fijas dependiendo de la variación del nivel de presión acústica entre diferentes posiciones. La distancia entre la muestra de ensayo (fachada) y los micrófonos debe ser de dos metros para el método global.

Para el método por elementos con altavoz, apartado 9.5, se deben utilizar las posiciones de micrófono sobre la muestra de ensayo (ventana) y el ángulo de incidencia del altavoz a 45º de la superficie de la fachada.

5.2.5.2 Interpretación de los resultados

Para la valoración del aislamiento acústico de la fachada se utilizará el documento básico DB-HR de protección frente al ruido y así observar si cumple con

las exigencias establecidas por éste. La interpretación de resultados se llevará a cabo según la plantilla de resultados de la normativa UNE_EN_ISO 16823-3.

Las exigencias de aislamiento acústico del exterior sólo se aplican a recintos protegidos. En el caso de otros recintos, como recintos de actividad, el DB-HR no especifica ningún nivel de aislamiento acústico, pudiendo la propiedad, el arquitecto o proyectista especificar qué condiciones acústicas deben tener estos recintos [21].

En este caso, para tener una referencia del cumplimiento de las exigencias, se supone que la sala de grabación (recinto receptor) es un recinto protegido.

En el apartado 2.1.1.4 dicta que para validar la protección frente al ruido procedente del exterior, el aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,\ nT,Atr}$, entre un recinto protegido y el exterior no será menor que los valores indicados por la tabla 2.1, en función del uso del edificio y de los valores del índice de ruido de día Ld.

Aun optando por los valores más estrictos, para estancias o aulas con un ruido de día (Ld) alto cumplimos con las exigencias ya que se tiene una diferencia de niveles $D_{2m,\ nT,Atr}$ de 44,6 dBA. Por lo tanto, se puede decir que la pared colindante con el exterior cumple con las exigencias de protección frente al ruido de la normativa.

A continuación, se representará gráficamente los resultados obtenidos basándonos en las plantillas de datos del Anexo F de la norma ISO 16823-3.

Índice de Reducción Acústica aparente medido de acuerdo con la Norma ISO 16283-3

Mediciones de campo del aislamiento acústico de las fachadas

Área de separación común: 0,5 m²

Volumen del recinto receptor: 35,7 m³

Clasificación de acuerdo a la norma ISO 717-1:

R´ 45 (C;Ctr) = 31 (0;-1) dB

C50-3150 = 0 dB **C50-5000** = -1 dB **C100-5000** = -1 dB

Ctr50-3150 = -3 dB **Ctr50-5000** = -3 dB **Ctr100-5000** = -2 dB

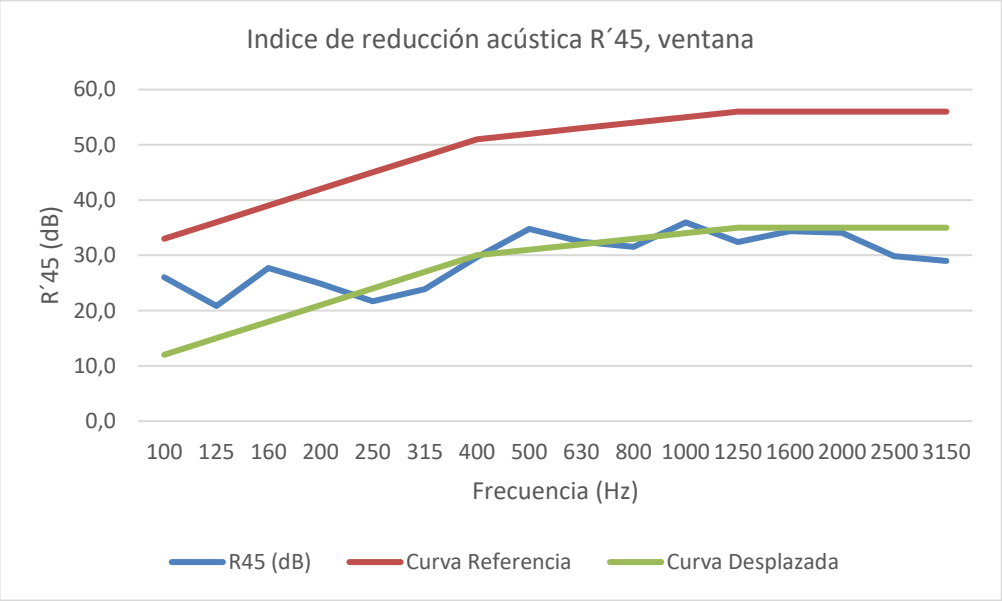


Figura 72. Gráfica del índice de reducción acústica R45 de la ventana en fachada.

5.2.6 Aislamiento a ruido de impactos.

Se entiende por ruido de impactos al “sonido aéreo” radiado a un recinto por una pared o suelo de una edificación, cuando es excitado estructuralmente. Al generarse un impacto sobre una estructura, esta entra en vibración radiando parte de la energía que no es absorbida a elementos constructivos que estén conectados e incluso a las partículas de aire adyacentes que serán perturbadas, generando ruido inducido.

Figura 73. Máquina de impacto.

5.2.6.1 Informe del Ensayo

Fecha de ensayo: 07/05/2018

Área de separación común: 9 m².

Volumen del recinto receptor: 31,5 m³.

Volumen del recinto emisor: 35,7 m³.

Descripción del ensayo: En este ensayo se procede a la medición in situ para valorar el aislamiento a ruido de impactos que se obtendrá en la sala de control frente al ruido de impacto generado en el suelo flotante de la sala de grabación, siguiendo las indicaciones de la Norma *UNE_EN-ISO 16283-2:2015.* El número de posiciones de micrófono y de fuente de impacto es determinado a partir del área del suelo de los recintos emisor y receptor, por ello se han tomado cuatro posiciones de la máquina de impactos y de micrófono para cada posición de fuente en el recinto emisor y cuatro posiciones en el recinto receptor, respetando las distancias mínimas entre micrófonos, fuente y superficies.

En la siguiente figura podemos ver un esquema de cómo se han dispuesto los aparatos de medida para poder calcular según dicta la normativa el nivel de ruido de impacto en el recinto emisor y receptor.

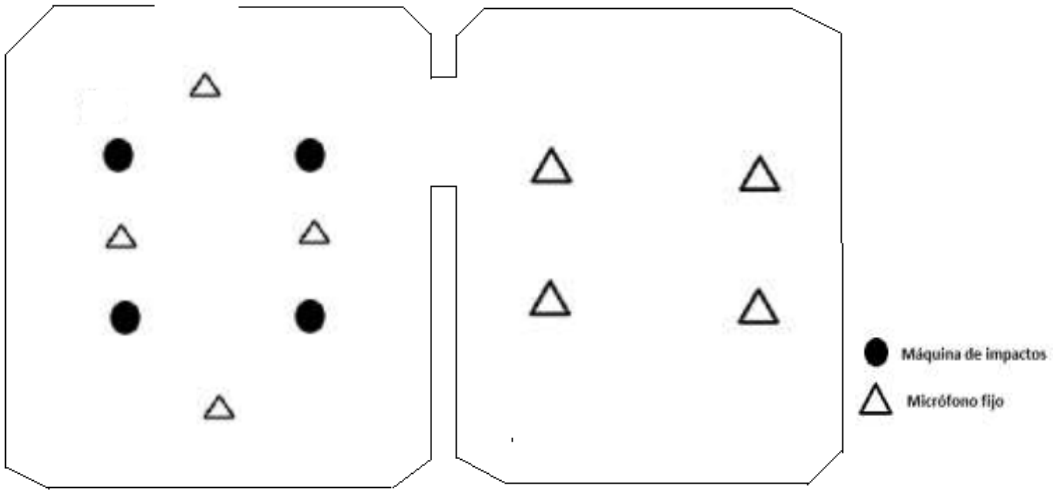


Figura 74. Esquema de posicionamiento para el aislamiento a ruido de impactos.

5.2.6.2 Interpretación de los resultados.

Para la valoración del aislamiento acústico de la fachada se utilizará el documento básico DB-HR de protección frente al ruido y así observar si cumple con las exigencias establecidas por éste. La interpretación de resultados se llevará a cabo según la plantilla de resultados de la normativa UNE_EN_ISO 16823-2.

Según el apartado 2.1.2.a.ii) del DB HR, para validar la protección frente al ruido en recintos protegidos, por ruido de impactos generado en recintos de instalaciones o en recintos de actividad: El nivel de presión de ruido de impactos, $L'_{nT,w}$, no será mayor que 60 dB.

Dado que el valor obtenido mediante las mediciones es un nivel de presión de ruido de impactos, $L'_{nT,w}$ de 56 dB, se puede decir que el suelo flotante del estudio de sonido cumple con las exigencias de protección frente al ruido en edificios.

Mediante la plantilla de expresión de resultados del anexo C de la normativa ISO 16283-2, se representará los datos obtenidos de los cálculos y mediciones.

Niveles de presión acústica estandarizados del ruido de impactos, L'_{nT}, de acuerdo con la Norma ISO 16283-2.

Mediciones *in situ* del aislamiento acústico al ruido de impactos de suelos utilizando la máquina de impactos.

Descripción: Las mediciones del nivel de presión acústica de ruido de impactos se ha llevado a cabo en el suelo del estudio de sonido de la escuela politécnica, concretamente en un suelo flotante compuesto por capas de protección a impactos laminadas y acabado de parquét.

Volumen del recinto receptor: 31.5 m^3

Clasificación de acuerdo a la norma ISO 717-2:

$L'_{nT,w}$ (C_I) = 56 (0) dB **$C_{I\ 50\text{-}2500}$** = 0 dB

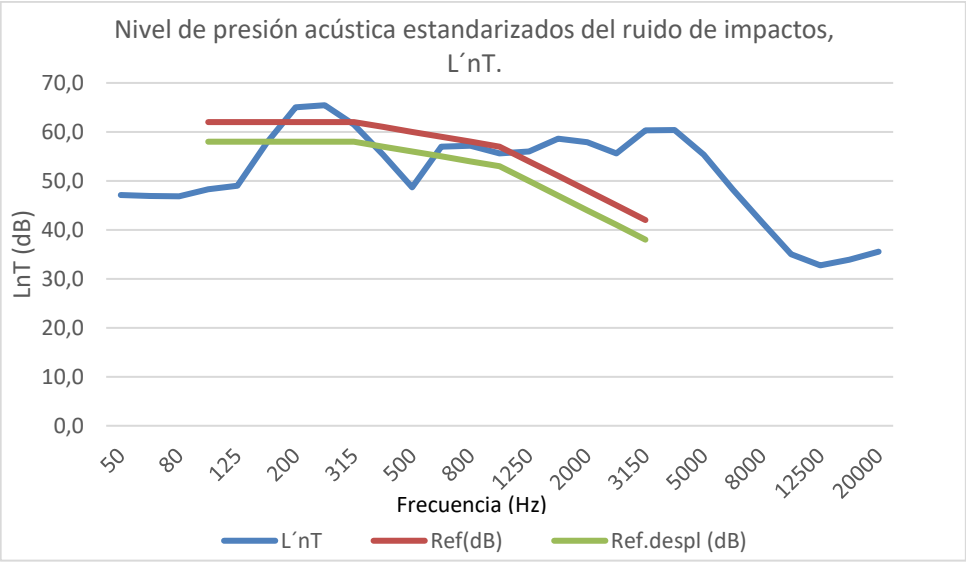


Figura 75. Gráfica de los valores obtenidos para la presión acústica estandarizada del ruido de impactos, LnT.

5.3 Medida de los Criterios de las Salas.

Las medidas acústicas adquiridas cumplen con las especificaciones de los estándares ISO actualmente en uso y como en los apartados anteriores, fueron exportadas desde el equipo de medida en una hoja de cálculo para permitir la comparación con los resultados de simulación realizada en Catt Acoustic v9.

Los valores obtenidos por frecuencias para cada posición de micrófono se encuentran en tablas en el Anexo B, apartado de medidas del criterio de salas.

En la barra de adquisición del programa dBBatti32 se accede al menú de medidas y se selecciona el icono “Criterio de salas”. En el menú “parámetros” se definen los parámetros acústicos que se quieren visualizar. Las medidas más relevantes para nuestro estudio:

Criterios de calidad: Tiempo de reverberación (RT30) y Early Decay Time (EDT).

Criterios de Energía: Claridad (C80) y Definición (D50).

Criterios de Inteligibilidad: Speech Transmission Index (STI) y Rapid Transmission Index (RASTI).

5.3.1 Tiempo de Reverberación.

Tal como nos indica la ISO 3382, los tiempos de reverberación correspondientes a cada punto de medida con cada fuente de emisión, evaluados

para cada frecuencia, se deben presentar en forma de gráfico y como valores en una tabla.

Las medidas se han realizado en tercios de octava desde la banda de frecuencia de 50 Hz hasta 20 kHz.

En la siguiente figura, se representa gráficamente los valores obtenidos del tiempo de reverberación para las dos salas, a partir del parámetro de medidas del criterio de salas que nos proporciona el programa dbBatti32. Por debajo de los 100 Hz los valores no son fiables debido a la falta de precisión de las medidas por parte del equipo de medida, por lo que los resultados se van a dar en un rango de 63 Hz a 16 kHz en bandas de octava.

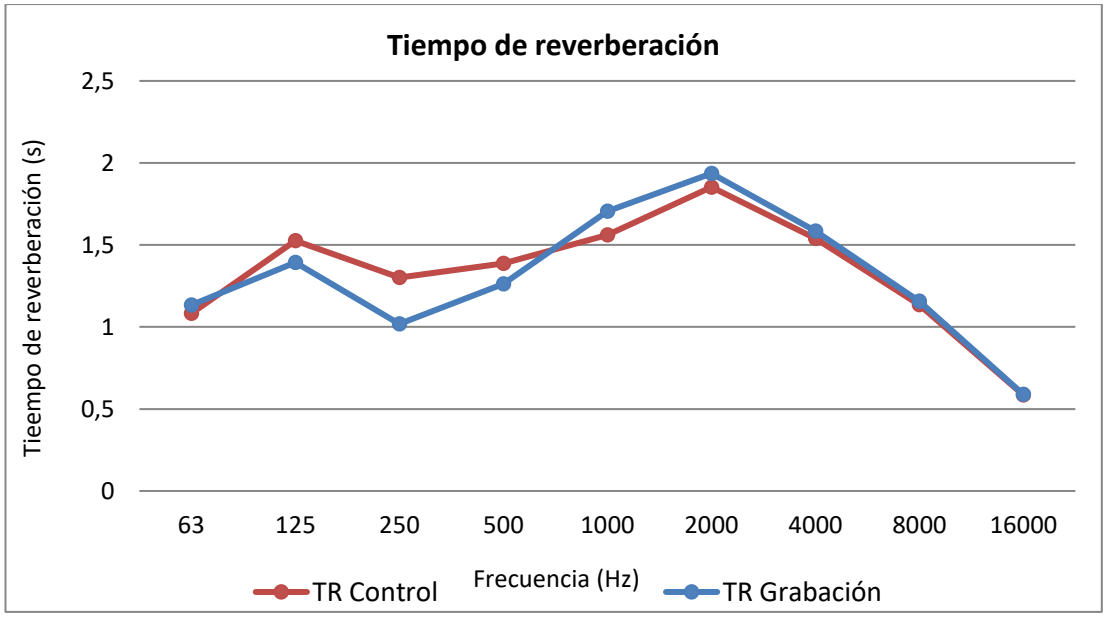


Figura 76. Gráfica del tiempo de reverberación para las dos salas mediante el criterio de calidad.

En la gráfica puede apreciarse como al igual que en los valores adquiridos del tiempo de reverberación para el cálculo del aislamiento acústico, existe un

aumento del TR en la banda de frecuencias medias, desde 250 Hz con un pico máximo a 2 kHz.

En la banda de frecuencias bajas, las paredes formadas por paneles de yeso laminado provocan una disminución del TR con respecto a la banda de frecuencias medias.

Por último, comentar como también se aprecia una disminución del tiempo de reverberación a frecuencias altas, a partir de los 2 kHz. Debido principalmente por la absorción del aire y el aislamiento interior de las paredes.

Como valor más representativo calculamos TR_{mid} para las dos salas, media aritmética de las frecuencias 500Hz-1KHz.

Parámetro	Sala vacía
TR_{mid} Sala Grabación	1,17 s
TR_{mid} Sala Control	1,17 s

Tabla 6. TR_{mid} medido en la sala vacía.

Leo Beranek [23] clasifica los tiempos de reverberación óptimos para distintos tipos de sala según su volumen y el propósito de las mismas o el estilo musical a ejecutar en ellas. Para nuestro recinto, el valor recomendado por Beranek está aproximadamente entre 0,25 y 0,5 segundos en salas ocupadas

5.3.2 EDT

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para el intervalo inicial de retardo (EDT).

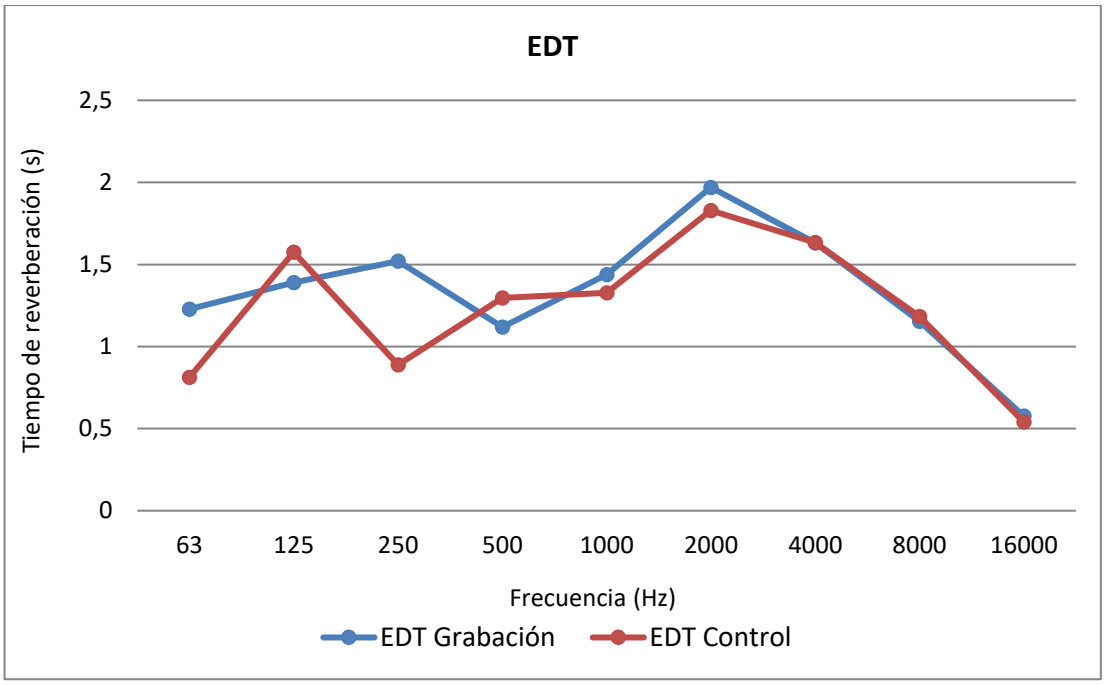


Figura 77. Gráfica de EDT para las dos salas mediante el criterio de calidad.

EDT_{mid} (Grabación)	1,27 segundos
EDT_{mid} (Control)	1,31 segundos

Tabla 7. Valores de EDT medidos.

5.3.2.1 Comparación entre TR y EDT

El EDT está relacionado con la impresión subjetiva de la reverberación de un recinto, lo que implica que para valores EDT sustancialmente menores que el tiempo de reverberación, la música sonará desde un punto de vista subjetivo más apagada, pero más inteligible la voz. Sin embargo, como se ve a continuación en la siguiente gráfica, los valores del EDT son prácticamente los mismos a los del TR.

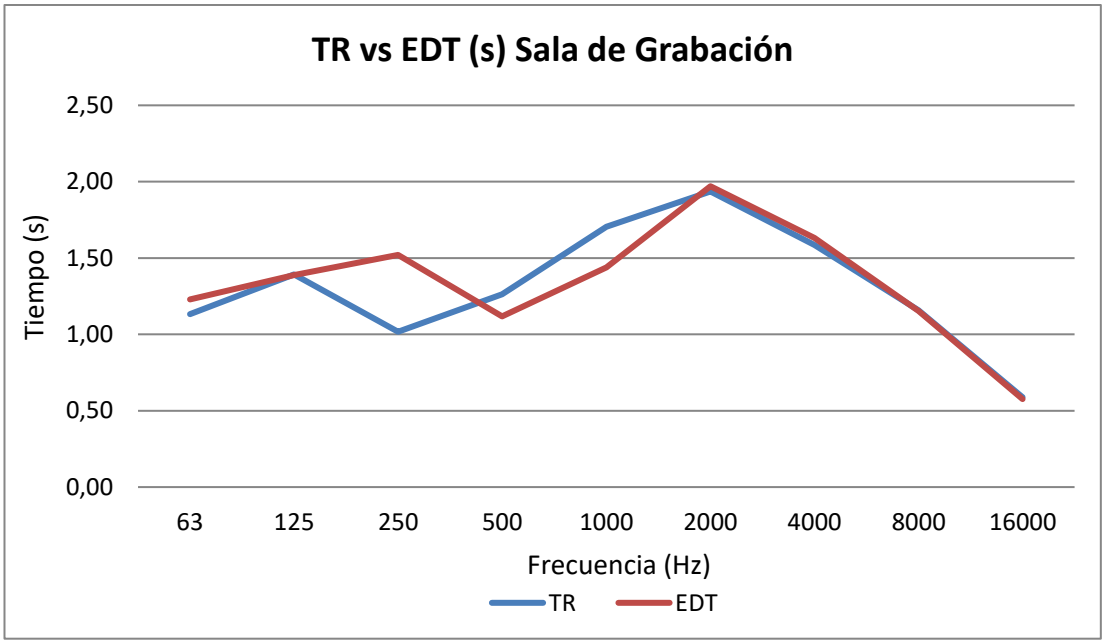


Figura 78. Comparación del TR y el EDT en la sala de grabación.

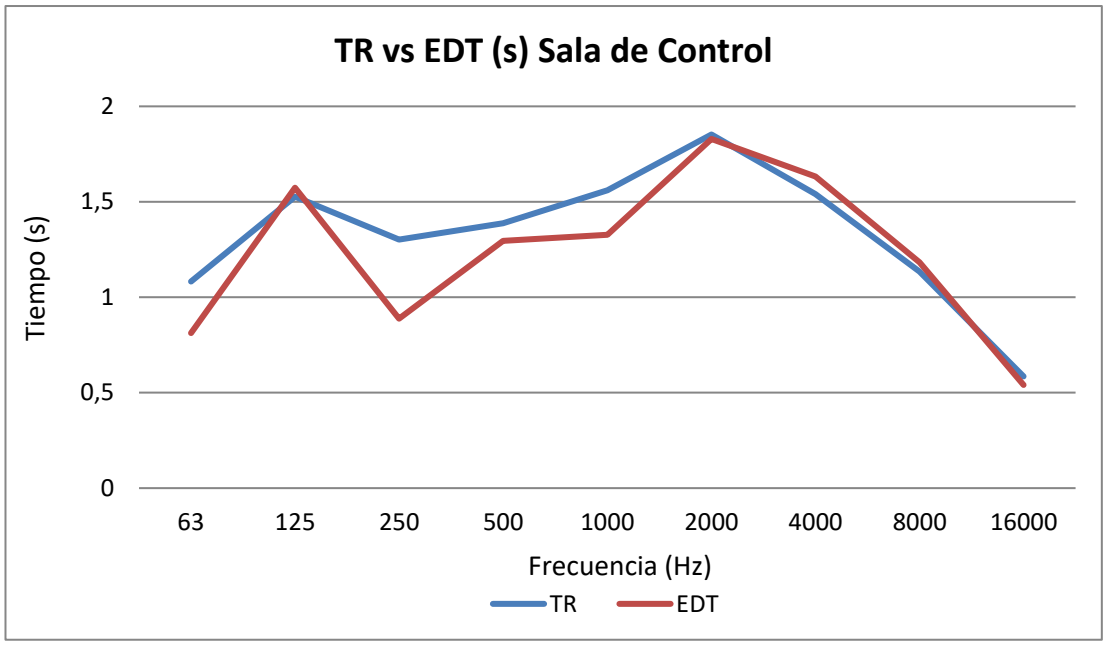


Figura 79. Comparación del TR y el EDT en la sala de grabación.

En la figura se puede observar como a la frecuencia de 250 Hz existe una significativa variación con respecto al tiempo de reverberación en ambas salas, con una disminución en la sala de grabación y un aumento respecto a la sala de control. Con este dato se puede deducir que a esta frecuencia en la sala de grabación la inteligibilidad de voz es mayor que la expresión musical y viceversa para la sala de control.

5.3.3 Definición, D_{50}.

Como ya se sabe, el parámetro acústico de definición D_{50}, representa la relación que hay entre la energía del sonido directo o reflejado que llega al receptor durante los primeros 50 ms y la energía de sonido total percibida.

F (Hz)	***63***	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
Media D50 (s) Grabación	0,40	0,38	0,55	0,50	0,41	0,31	0,34	0,50	0,74
Media D50 (s) Control	0,50	0,34	0,54	0,42	0,37	0,33	0,37	0,48	0,78
$D50_{mid}$ Grabación	0,46								
$D50_{mid}$ Control	0,46								

Tabla 8. Valores promedios de definición para las dos salas.

En las siguientes figuras, se representan los valores medidos de D_{50} en las 6 posiciones de micrófono, para cada una de las bandas de octava entre 63 y 16000 Hz en sala vacía.

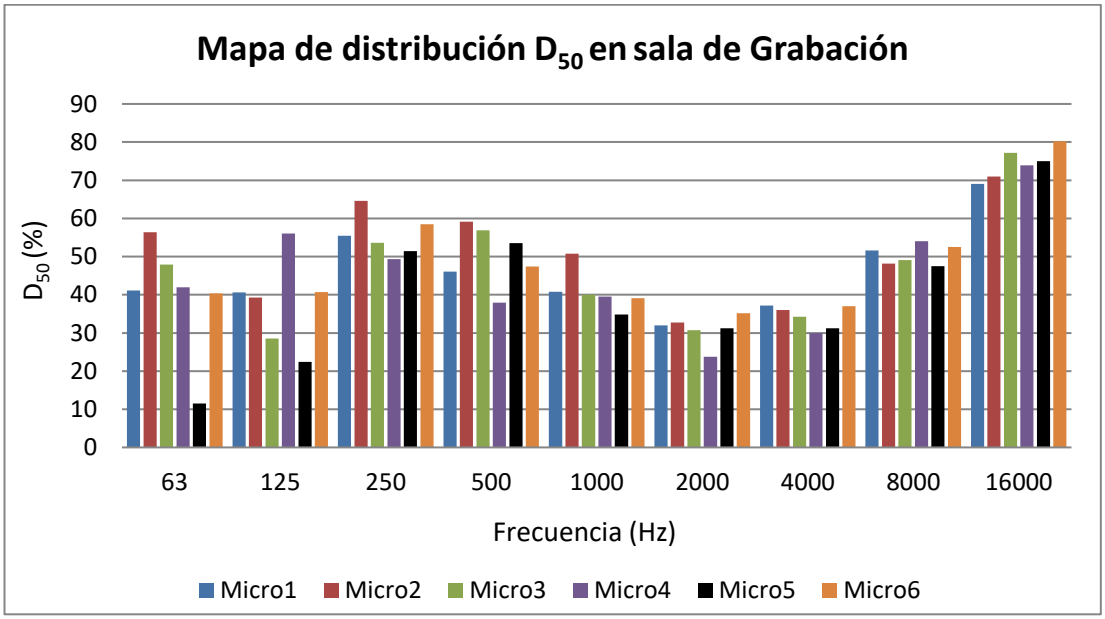


Figura 80. Gráfica de valores D_{50} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de grabación.

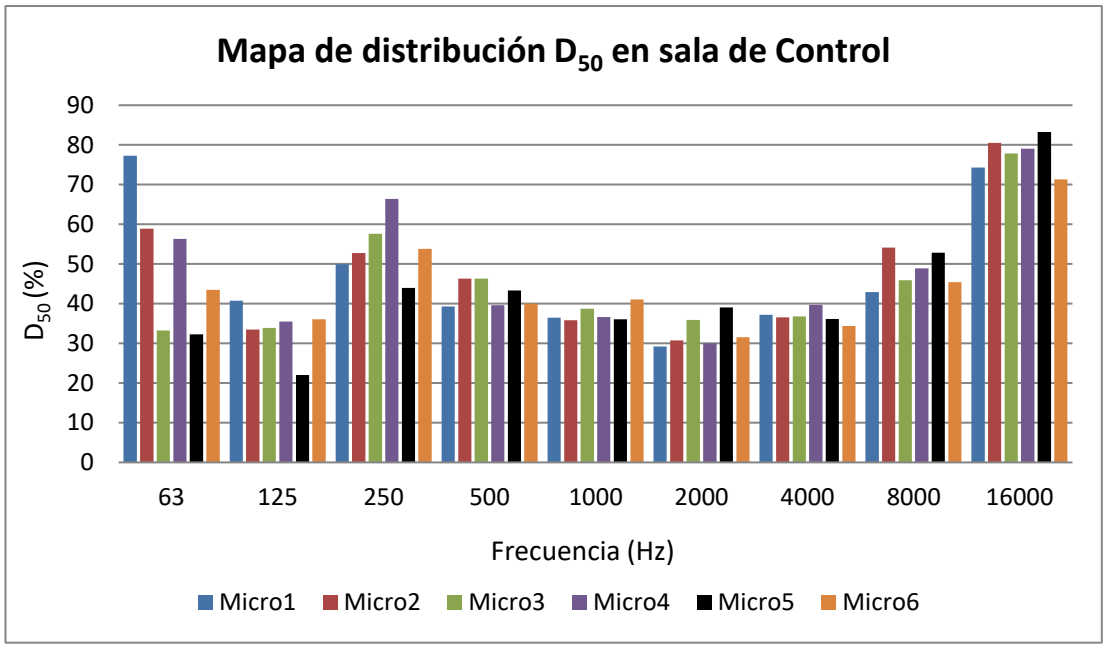


Figura 81. Gráfica de valores D_{50} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de control.

La apreciable variación de los valores para cada banda de frecuencia se debe a que D_{50} es fuertemente dependiente de la posición del receptor. Al igual que con el tiempo de reverberación, esta variación es fuertemente notable en la banda de frecuencias graves, debido a la falta de precisión en estas frecuencias por los equipos de medida provocando incertidumbre.

En la tabla y figura siguiente se indican los valores medios de D_{50} para cada una de las bandas de octava entre 125 y 16 kHz en sala vacía.

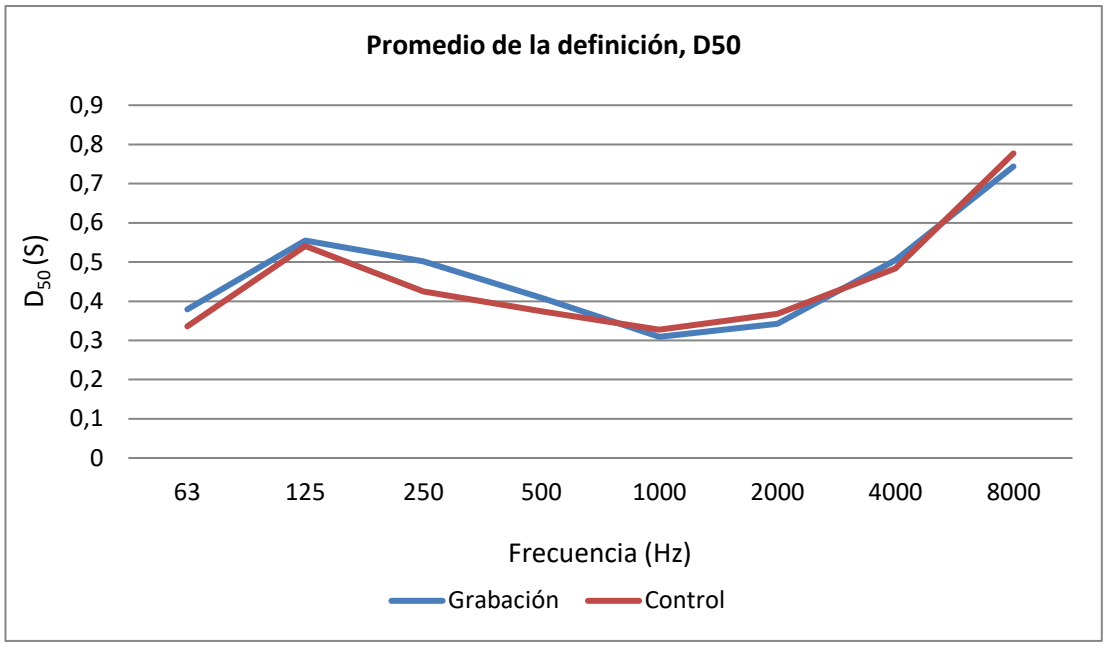


Figura 82. Valores D_{50} (s) medidos.

En las salas en vacío, la definición se encuentra entre 0,3 y 0,8 segundos. Se puede observar que la mayoría de los valores se encuentran por debajo de 0,5 segundos, valor mínimo recomendado, por lo tanto, la concentración de energía de las primeras reflexiones es insuficiente para tener una buena inteligibilidad de palabra.

Se necesitan valores más altos de definición, es decir, valores bajos de tiempo de reverberación y así obtener una sala óptima para la complejidad rítmica de la música que se grabará y reproducirá en el estudio de grabación y sala de control.

5.3.3 Claridad de voz, C_{50}

El parámetro C_{50} define la inteligibilidad de la palabra y de la música cantada. Se va a calcular a partir de los valores obtenidos del parámetro de definición, D_{50}.

Para ello, es despejada de la fórmula del cálculo de definición, D_{50} resultando la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \qquad C_{50} = 10\log\frac{\int_0^{0,005} p^2(t)dt}{\int_{0,005}^{\infty} p^2(t)dt} \text{ (en dB)}$$

$$C_{50} = 10 \cdot log\ (D_{50} - 0{,}1) + 4\ (dB) \qquad (43)$$

A continuación, se muestran los valores medidos de la claridad junto con el valor del $C50_{average}$. Las bandas en las que se realiza el promedio son las bandas de 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.

Frecuencia (Hz)	*125*	*250*	*500*	*1000*	*2000*	*4000*	*8000*	*16000*
Promedio C_{50} (dB) Grabación	-1,54	0,58	0,04	-1,11	-2,79	-2,15	0,07	2,09
Promedio C_{50} (dB) Control	-2,27	0,44	-0,89	-1,61	-2,43	-1,72	-0,16	2,31
Speech Average (dB) Grabación	*-1,79*	*dB*						
Speech Average (dB) Control	*-1,82*	*dB*						

Tabla 9. Valores de $C_{50avergafe}$ medido.

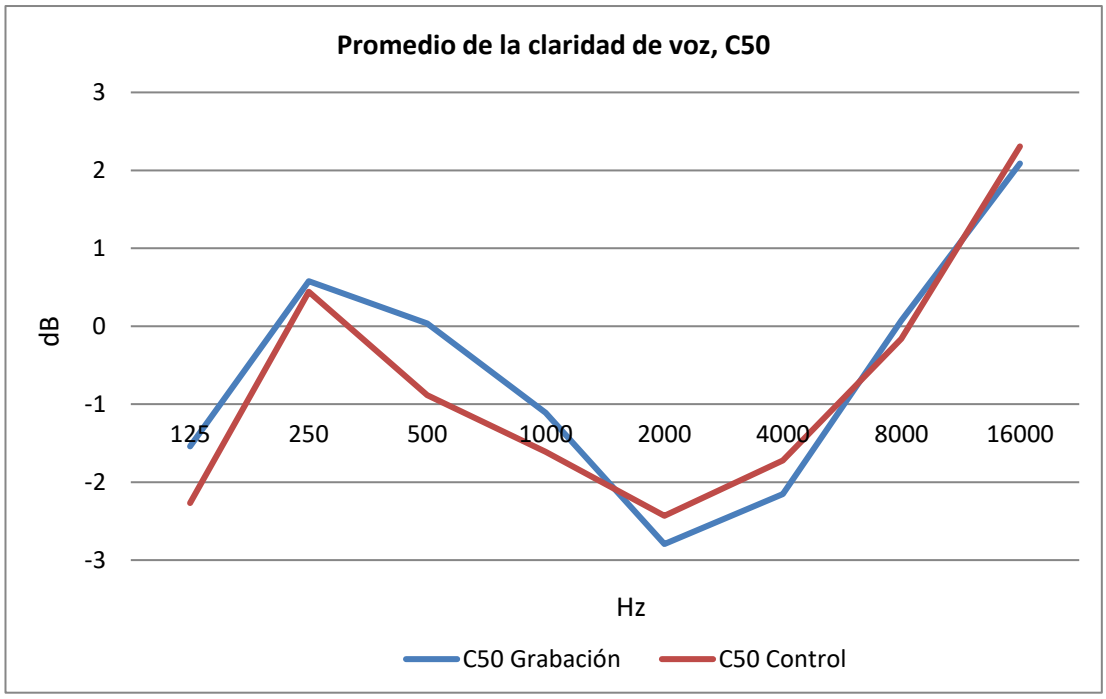


Figura 83. Valores de C_{50} medidos.

Se recomiendan valores de *Speech Average* mayor o igual a 2 dB para salas vacías, por cual es indicativo de que la inteligibilidad de la palabra y sonoridad no son correctas para este tipo de recintos.

5.3.4 Claridad musical, C_{80}

El parámetro C_{80} se define como el cociente entre la energía sonora recibida durante los 80 ms después de recibir el sonido directo y la energía que llega después de esos 80 ms.

En la siguiente tabla se muestran los promedios obtenidos de las medidas en el estudio de grabación.

F (Hz)	***63***	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
Promedio Grabación	0,67	1,58	4,00	2,98	1,05	-0,83	-0,18	2,47	8,53
Promedio Control	4,05	0,00	4,68	1,87	0,87	-0,68	0,25	2,32	8,97
Music Average Grabación	1,07								
Music Average Control	0,68								

Tabla 10. Valores de $C_{80avergafe}$ medido.

En las siguientes figuras, se representan los valores medidos de D_{50} para cada una de las bandas de octava entre 63 y 16000 Hz en sala vacía.

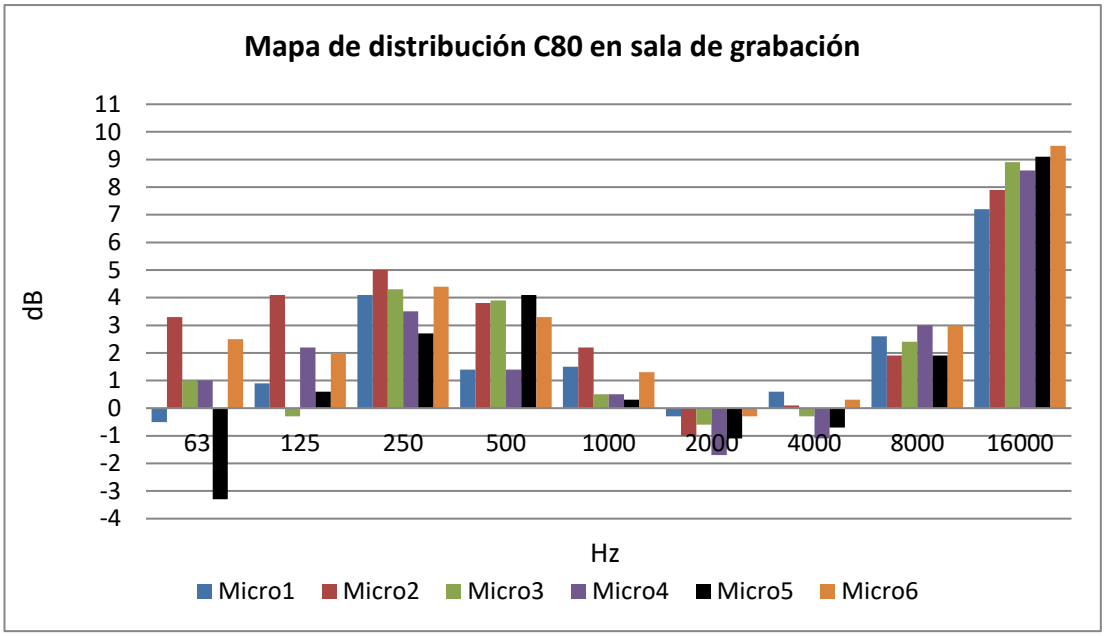


Figura 84. Gráfica de valores C_{80} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de grabación.

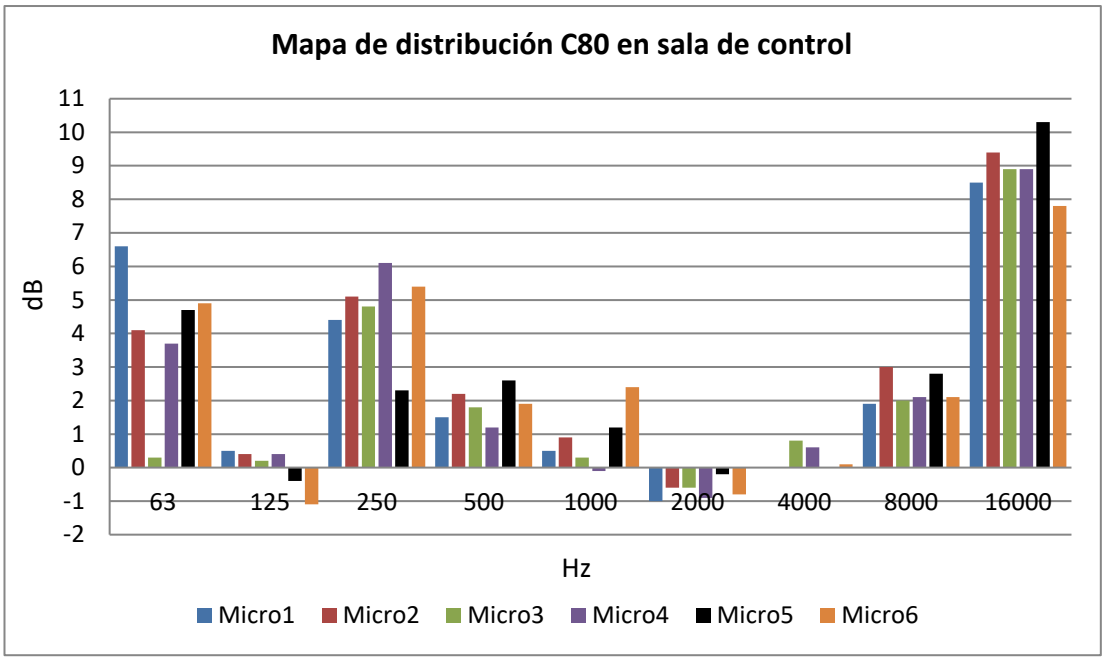


Figura 85. Gráfica de valores C_{80} para las distintas posiciones de micrófono en la sala de control.

Al igual que los valores de definición D_{50}, la apreciable variación de los valores para cada banda de frecuencia se debe a que C_{80} es fuertemente dependiente de la posición del receptor. La alta variación producida en la banda de frecuecia de 63 Hz, como en casos anteriores, principalmente debida a la baja precisión de medidas de los equipos.

A continuación, en la siguiente figura se representa el valor promedio de claridad musical C_{80} (dB) por bandas de frecuencia de octavas para las dos salas del estudio de grabación.

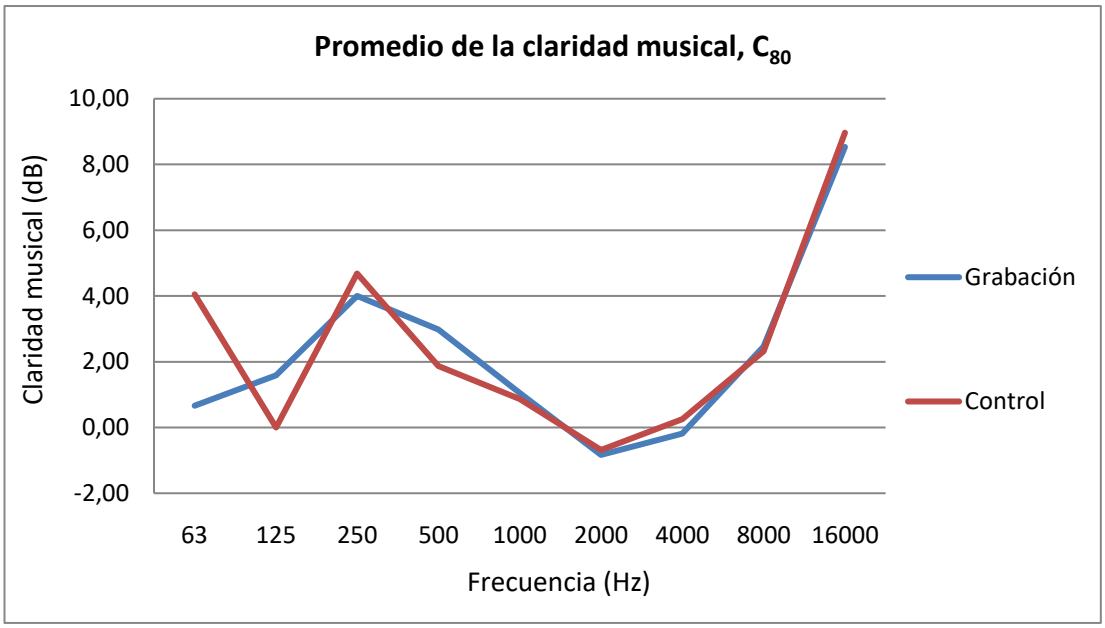


Figura 86. Gráfica del promedio de claridad musical, C_{80} para las dos salas.

Para instrumentos electrónicos, Marshall recomienda un valor entre 4 y 12 dB para sala vacía [5]. Los valores obtenidos no se hayan dentro del margen recomendado.

Este parámetro acústico mide el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical, que como se aprecia en la figura anterior no es correcto.

Por último, hay que mencionar que tanto el parámetro C_{50} como el C_{80} no son estadísticamente independientes, sino que varían con el tiempo de reverberación, aumentando a medida que este disminuye.

5.3.5 STI

Por último, en las siguientes tablas y figuras se muestran los índices que cuantifican la inteligibilidad del habla en las dos salas del estudio de sonido para las seis posiciones de micrófono.

Sala de Grabación

	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Micro 4	Micro 5	Micro 6	Media
STI	0,55	0,56	0,54	0,52	0,53	0,55	0,54
RASTI	0,53	0,56	0,56	0,52	0,56	0,57	0,55

Tabla 11. Valores RASTI y STI en la sala de grabación.

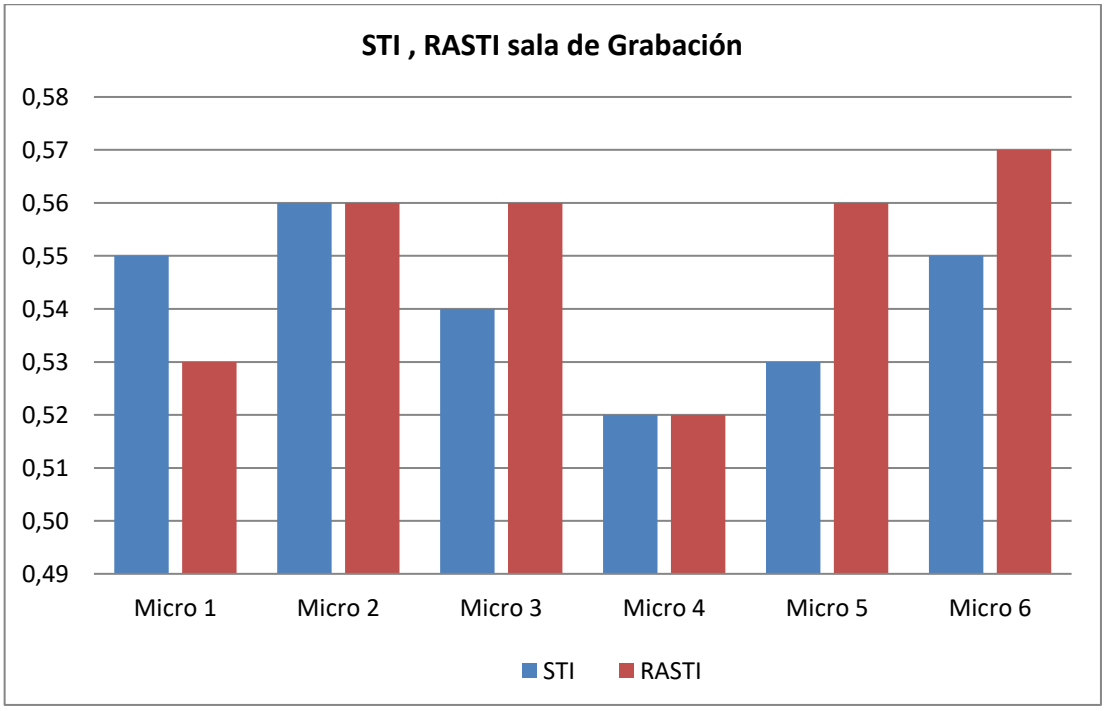


Figura 87. Gráfica de valores STI y RASTI para cada posición de micrófono en sala de grabación.

Sala de Control

	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Micro 4	Micro 5	Micro 6	Media
STI	0,52	0,53	0,54	0,54	0,52	0,53	0,53
RASTI	0,53	0,55	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54

Tabla 12. Valores RASTI y STI en la sala control.

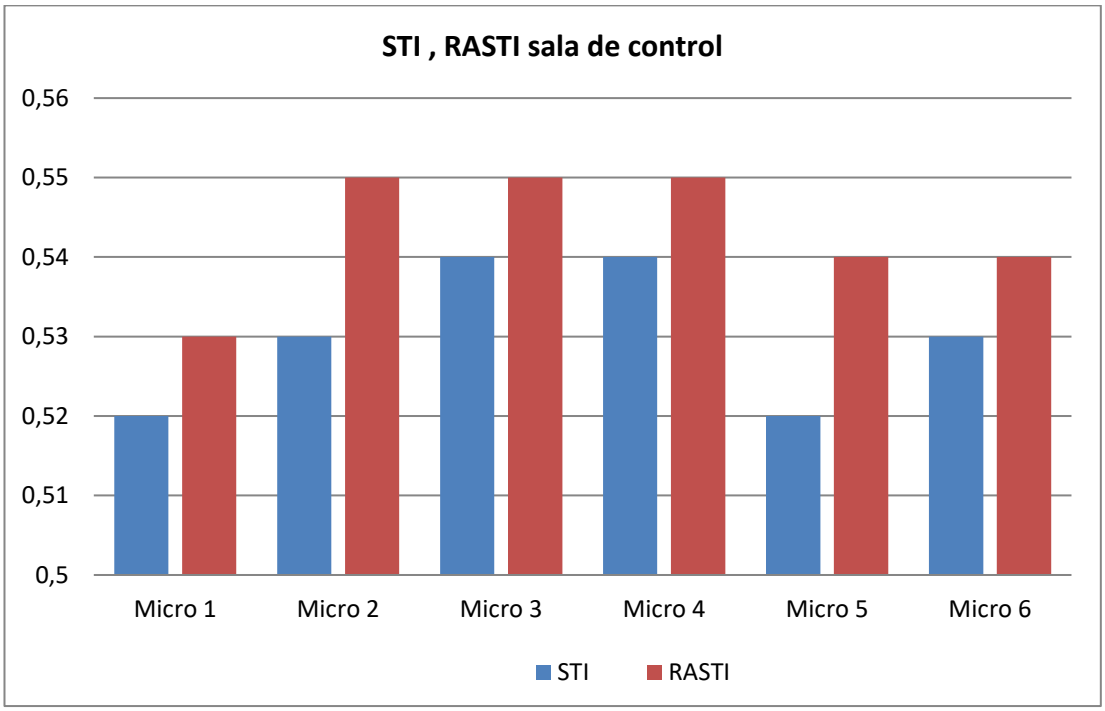


Figura 88. Gráfica de valores STI y RASTI para cada posición de micrófono en sala de control.

El más fiable es el STI, puesto que el RASTI es una aproximación derivada de él. Según la clasificación de la tabla 3, del apartado 2.2.10, para estos valores de inteligibilidad del habla, se puede decir que la sala tiene una inteligibilidad "*Aceptable*".

5.3.6 Resumen y valoración

5.3.6.1 Resumen

Parámetros	Mediciones en sala vacía	Valor óptimo música amplificada	Valoración
TR_{mid} (s)	Grabación 1,17s Control 1,17s	0,25 - 0,5 seg	No cumple
EDT_{mid} (s)	Grabación 1,27s Control 1,31s	Valores que hacen que el EDT_{mid} sea del orden del TR_{mid}	Buena
D_{50} (s)	Grabación 0,46s Control 0,46s	> 0,5s	No cumple
$C_{50average}$ (dB)	Grabación -1,79dB Control -1,82 dB	> 2 dB	No cumple
$C_{80average}$ (dB)	Grabación 1,07 Control 0,68	4 < C_{80} (dB) > 12	No cumple
STI	Grabación 0,54 Control 0,53	0,75 < STI > 1 Muy buena	Aceptable
RASTI	Grabación 0,55 Control 0,54	0,75 < STI > 1 Muy buena	Aceptable

Tabla 13. Resumen valoración acústica del estudio de grabación.

5.3.6.2 Valoración general del estudio

La valoración del recinto como estudio de grabación, según la información que se dispone sobre los valores recomendados para estos recintos no es satisfactoria.

Los tiempos de reverberación medidos son superiores a los recomendados para este tipo de salas y, por lo tanto, en capítulos posteriores se hace una predicción de mejora para conseguir los valores recomendados.

La similitud de los valores en la mayoría de las bandas de frecuencia del EDT y del TR es indicativa de la existencia de una buena difusión del sonido

Los valores de definición son muy próximos al valor mínimo recomendado y se puede decir que las salas tienen una expresión musical aceptable.

El grado de separación que se aprecia entre los distintos sonidos de una composición musical, C_{80}, no es el adecuado para instrumentos electrónicos y amplificados

La inteligibilidad de la palabra en todos los puntos de las salas medidos es “aceptable”.

6. SIMULACIÓN EN CATT ACOUSTIC v9.1.

6.1 Modelado acústico por ordenador

6.1.1 Introducción

Una vez realizada las medidas y obtenidos los parámetros acústicos más representativos del estudio de grabación, es imprescindible realizar una simulación del recinto utilizando un software de predicción acústica para poder realizar una propuesta de mejora de acondicionamiento acústico en las salas.

En este apartado se procede a la validación de los resultados medidos en el estudio de sonido mediante el programa de simulación acústica Catt Acoustic v9.1.

El ajuste del modelo numérico es imprescindible para que represente lo más fiablemente la realidad. Para esto se han modificado algunos de los parámetros que permite el programa y así obtener los parámetros acústicos mediante la simulación de salas dedicadas a la música.

Se compara los resultados medidos y simulados para determinar la precisión con que la simulación se ajusta a las medidas.

Para la realización de un modelo por ordenador es necesario:

- Introducir la geometría del recinto en el software de simulación

- Asignar materiales a las superficies
- Posicionamiento de equipos de medida

Para validar el modelo, es decir, que el recinto virtual representa al recinto real con ciertos márgenes de variación, se utiliza un estimador denominado JND (just noticeable difference). Para que los resultados obtenidos en una simulación acústica sean fiables es necesario que la diferencia entre en valor real medido in situ y el valor simulado por ordenador sea inferior al JND.

A continuación, se describe el proceso de creaión del modelo por ordenador del estudio de grabación.

6.1.2 Diseño del modelado

El programa Catt Acoustic es un reconocido software de simulación acústica y electroacústica ampliamente utilizado por profesionales del área. Permite la creación de un modelo acústico 3D. En este proyecto se ha utilizado, concretamente, la versión 9.1b del software.

6.1.2.1 Geometría

Para realizar un modelo por ordenador del estudio de grabación, en primer lugar, se introduce la geometría del recinto en el software de simulación. Se puede realizar directamente mediante Catt Acoustic o con otro software que permita realizar el modelo de manera más cómoda.

En este proyecto se ha realizado el modelo directamente en el programa Catt Acoustic mediante la inserción de medidas realizadas en el estudio de

grabación, debido a la falta de planos que nos facilitaran las dimensiones del recinto.

En las siguientes figuras se muestran los planos utilizados como base para la creación del modelo virtual. Como se ha mencionado anteriormente, los planos fueron creados mediante las medidas de las superficies realizadas una vez construidos los cerramientos del recinto.

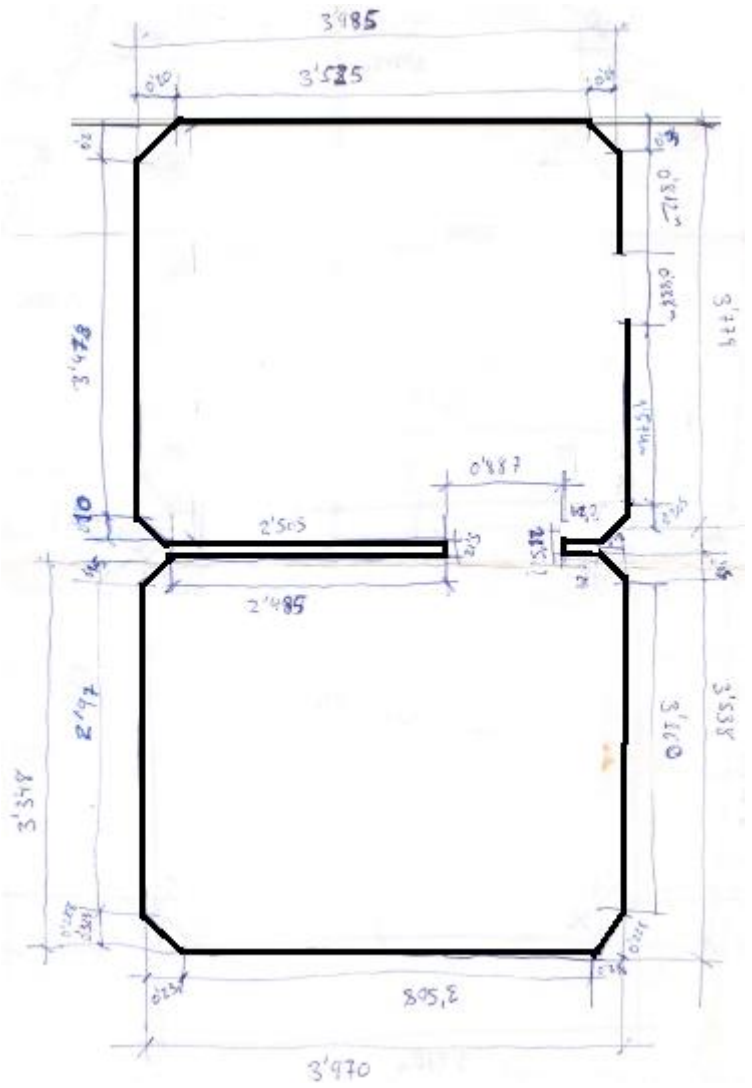


Figura 88. Vista en planta del recinto

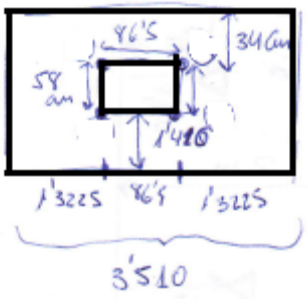


Figura 89. Vista perfil ventana acústica sala de grabación.

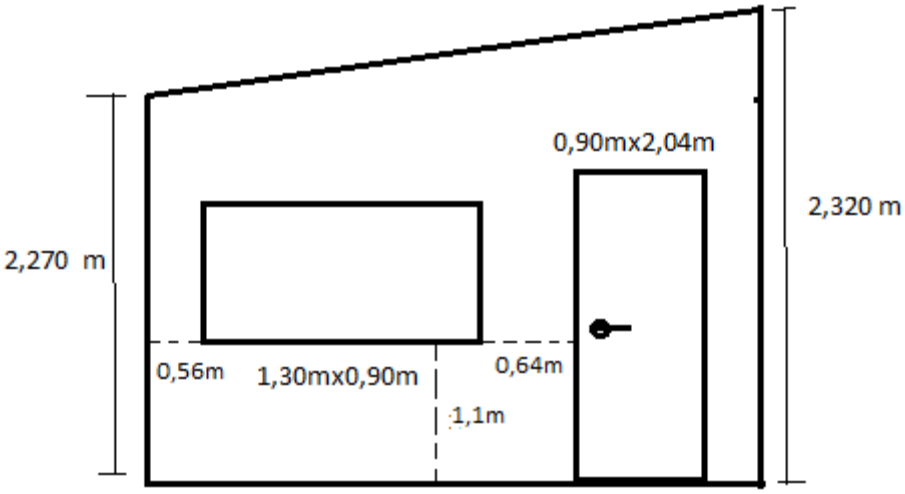


Figura 90. Vista perfil del tabique de separación entre salas.

En la siguiente figura se muestra la geometría del modelo realizado en Catt Acoustic. Vista en 3D del diseño y distribución de fuentes y receptores del estudio de sonido.

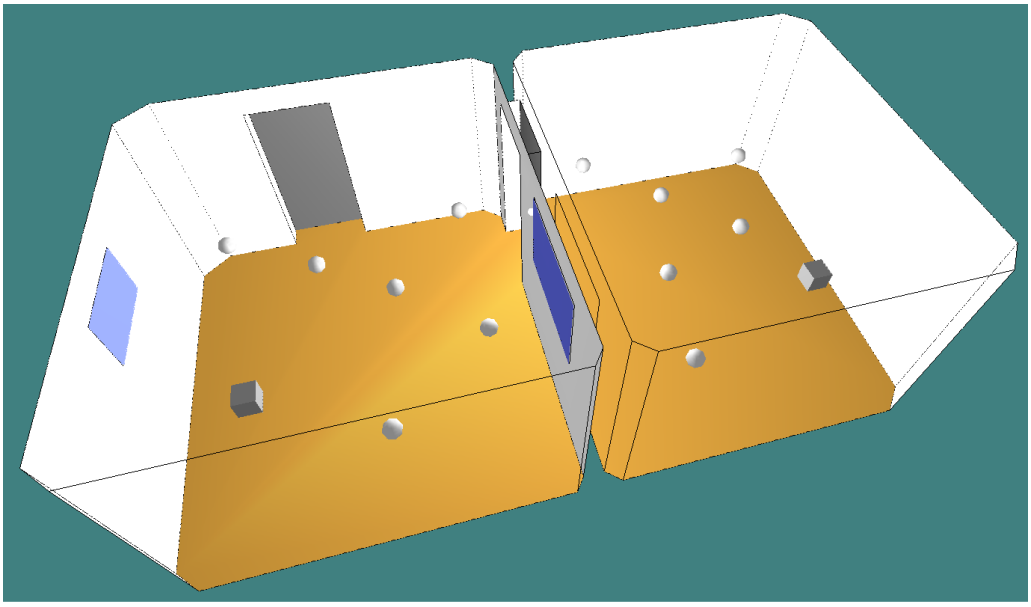


Figura 91. Modelo virtual del estudio de grabación en Catt Acoustic.

Como se puede apreciar, la sala de grabación (izquierda) contiene la puerta de entrada al estudio de sonido, puerta y acristalado que separa la sala de control y una ventana colindante con la fachada que da al exterior del recinto.

En la siguiente figura se muestra las vistas en alzado y planta del modelo de simulación del estudio de sonido y así observar detalladamente la geometría del recinto.

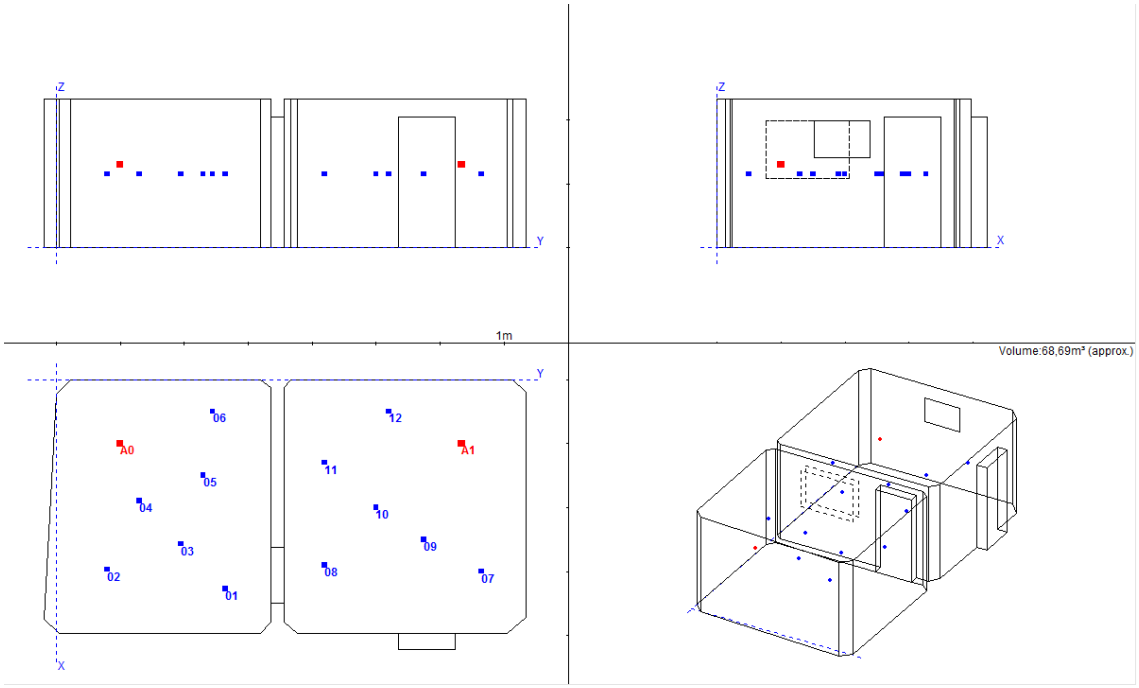


Figura 92. Vista en planta, alzado y perfil del modelo de simulación.

Se puede observar en la vista en planta de la sala de control el diseño específico de salas non-rectangular, consiste en inclinar verticalmente la pared lateral y la pared trasera, así conseguir mitigar los modos propios creados por el paralelismo de superficies.

6.1.2.2 Definición de superficies. Materiales

A continuación, se incluyen los materiales que conforman cada una de las superficies del recinto. Si se conocen los valores del coeficiente de absorción de los materiales pueden introducirse estos datos manualmente creando un nuevo material. Catt Acoustic dispone de una amplia base de datos de materiales que pueden ser utilizados.

Para este apartado se han utilizado los siguientes materiales, cada uno de ellos con sus respectivos coeficientes de absorción:

Material	125	250	500	1000	2000	4000	Ubicación
Yeso laminado	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	Paredes y techo
Vidrio	0,25	0,1	0,07	0,06	0,04	0,02	Ventanas
Puerta acústica	0,11	0,27	0,71	1	1	0,99	Puertas
Tarima	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	Suelo

Tabla 14. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados.

A continuación, en la siguiente gráfica se muestran los coeficientes de absorción de los materiales.

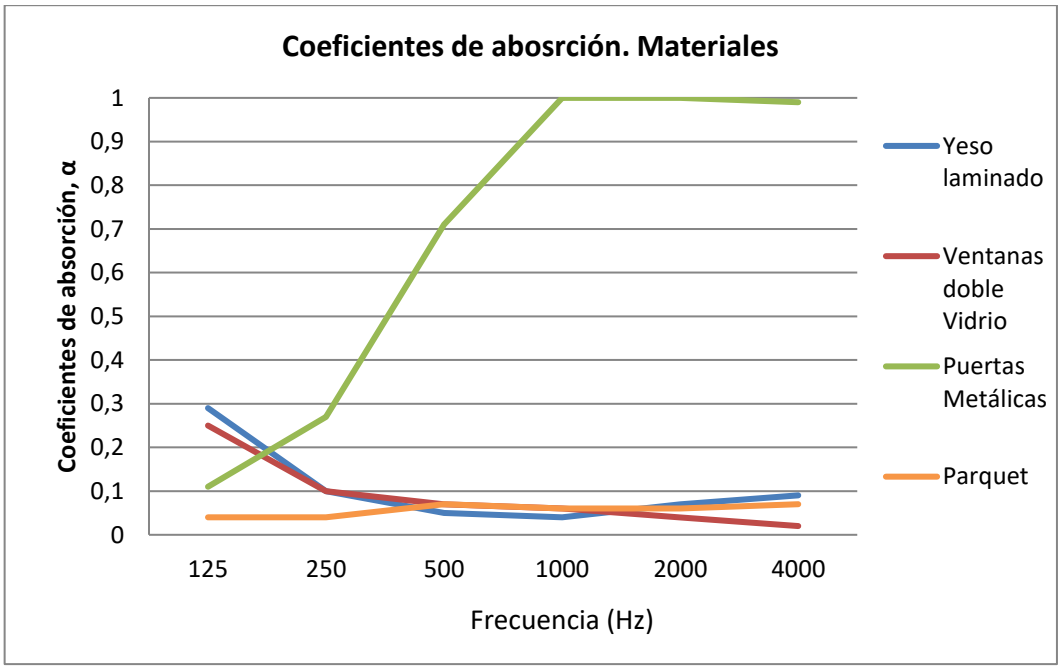


Figura 93. Gráfica de valores del coeficiente de absorción de los materiales.

6.1.2.3 Posiciones de fuente y micrófono

Para realzar la simulación se deben incluir en el modelo las posiciones de las fuentes y micrófonos. Las fuentes y micrófonos se han colocado a una altura de 1,3 y 1,15 metros respectivamente, respetando la distancia de 1 metro entre superficie y equipo de medida.

Para poder establecer comparaciones entre las medidas in situ y la simulación, se colocan el mismo número de posiciones de medida y en la misma ubicación que cuando se realizaron las medidas. Posicionamiento llevado a cabo en las medidas del criterio de salas según dicta la normativa UNE-EN_ISO_3382-2: 2008 [13].

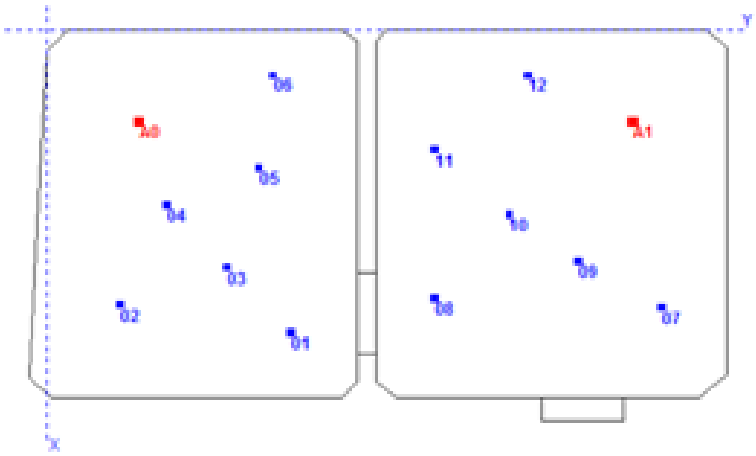


Figura 94. Posiciones de fuentes y micrófonos.

6.2 Validación del modelo

Una vez que se tiene la geometría en Catt Acoustic, con los materiales asignados, posiciones de fuente y micrófonos, se seguirá el siguiente proceso para realizar la validación del modelo:

- Simulación.
- Modificación de los coeficientes de absorción de los materiales hasta que se tengan valores del orden de los medidos.
- Comparación de los parámetros simulados con los medidos.

Para realizar estos cálculos se han seleccionado 2 fuentes omnidireccionales y 12 micrófonos repartidos por el recinto, dividido por igual entre las salas de grabación y control, así como con los puntos de medida que se utilizaron para las medidas in situ. También, al igual que para el cálculo de los parámetros medidos, se hace el promedio de todas las combinaciones fuente - receptor y se comparan con los valores medidos.

Mediante el módulo de estimación del TR se han obtenido valores inferiores del tiempo de reverberación con respecto a los medidos. Se procedió a la modificación de los coeficientes de absorción de los materiales. Concretamente, hubo que disminuir la absorción de las dos puertas acústicas y de dos superficies de PYL, debido a que durante la fase de medidas aún no se había completado la instalación de algunas cajas de electricidad y un correcto sellado de las puertas provocando pérdidas de energía.

Una vez ajustado el TR, se comprueba mediante el módulo predicción que el resto de parámetros sean del orden de los valores obtenidos in situ. Para confirmar que los parámetros acústicos de la simulación representan correctamente los de las medidas reales se utiliza un estimador, JND.

6.2.1 JND

El JND [2] hace referencia a la variación más pequeña que el oído humano es capaz de distinguir entre dos estímulos diferentes. Este umbral subjetivo representa la precisión acústica de la simulación, de manera que, si la diferencia entre el valor simulado y el valor medido de un parámetro acústico determinado se encuentra por debajo del JND, no existirá diferencia perceptible entre ambos valores y se podrá dar como válidos los resultados obtenidos de la simulación acústica.

En la siguiente tabla se muestran los umbrales óptimos para la evaluación de los parámetros acústicos.

Parámetro acústico	Umbral JND
T_{30}, EDT (s)	± 5 %
C_{50}, C_{80} (dB)	± 1 dB
D_{50} (%)	± 5 %
STI	± 0,05

Tabla 15. Parámetros acústicos con su JND asociado.

Si el valor JND umbral es superado, pero se encuentra por debajo de dos veces el umbral, la simulación es buena. Si el valor se encuentra por debajo del

umbral, la simulación se considera excelente. Las frecuencias de evaluación de los JND son 500 y 1000 Hz.

6.2.2 Resultados mediante predicción/aura

Los valores que toman los distintos parámetros obtenidos a través de la simulación se presentan acompañados de los valores medidos in situ y el error existente a frecuencias medias entre ambos valores que servirá como comprobación de la validez del modelo en Catt Acoustic.

6.2.2.1 Tiempo de reverberación, T30

Las siguientes figuras representan mediante el módulo de Estimación del TR los valores del tiempo de reverberación simulados T_{30}, Eyring y Sabine junto al TR referencia de los valores medidos in situ para cada banda de octava comprendidas entre 125 Hz y 16 kHz.

Sala de Grabación

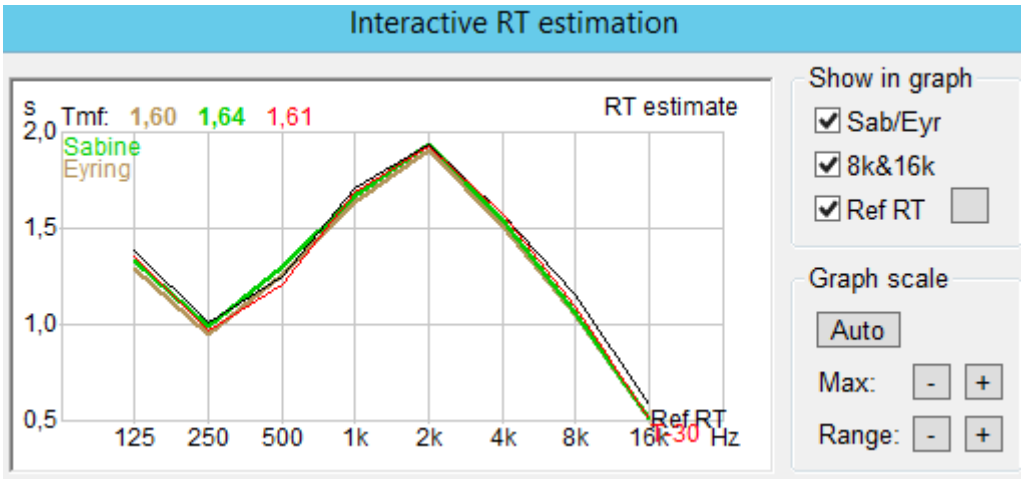


Figura 95. Gráfica de estimaciones del TR en sala de grabación.

Frecuencia (Hz)	*T30 medido (s)*	*T30 simulado (s)*	*Error (%)*
125	1,39	1,36	1,18
250	1,02	0,98	1,88
500	1,26	1,22	1,69
1000	1,71	1,69	0,44
2000	1,94	1,94	-0,11
4000	1,58	1,57	0,46
8000	1,16	1,09	3,01
16000	0,59	0,52	6,18
		$T30_{mid}$	
		Error (%) = 0,97	

Tabla 16. T30 (s) medido vs simulado en sala de grabación mediante predicción.

Se puede observar que los valores obtenidos se encuentran dentro de los márgenes de error permitidos. La diferencia entre el T_{30} medido y el simulado, a frecuencias medias, es inferior al 1 %. La diferencia de los valores simulados y los medidos es menor a un JND, por lo que la simulación se considera muy buena.

Sala de Control

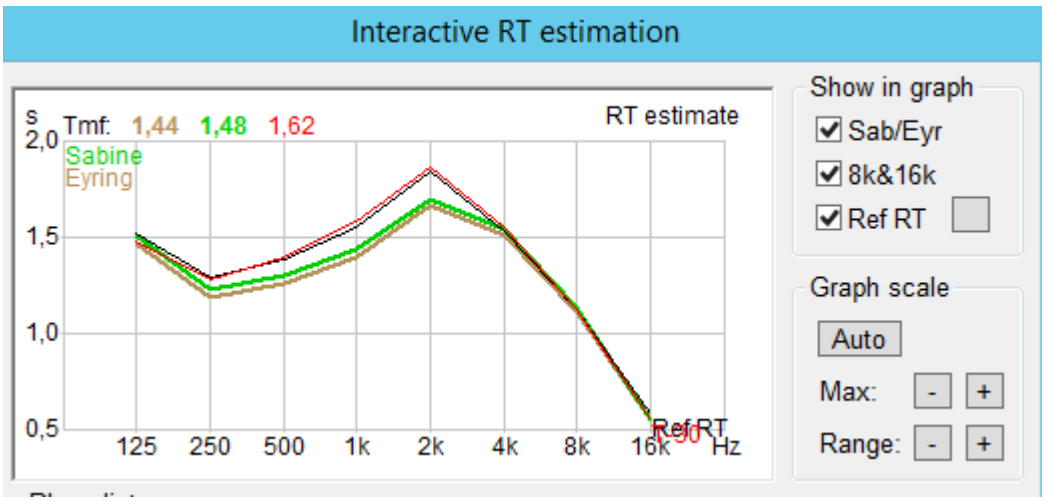


Figura 96. Gráfica de Estimaciones del TR en sala de control.

Frecuencia (Hz)	***T30 medido (s)***	***T30 simulado (s)***	***Error (%)***
125	1,53	1,48	1,66
250	1,30	1,28	0,78
500	1,39	1,40	-0,36
1000	1,56	1,58	-0,64
2000	1,85	1,87	-0,54
4000	1,54	1,56	-0,65
8000	1,13	1,13	0,00
16000	0,59	0,55	3,51
		$T30_{mid}$ (s)	
		Error (%) = 0,59 %	

Tabla 17. T30 (s) medido vs simulado en sala de control mediante predicción.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de los márgenes de error permitidos. La diferencia entre el T_{30} medido y el simulado, a frecuencias medias, es inferior al 1 %. La simulación se considera excelente.

Una vez ajustados los coeficientes de absorción de los materiales y estar en los márgenes de error JND permitidos mediante la estimación del TR, se procede a la validación de los demás parámetros acústicos.

6.2.2.2 Tiempo de caída inicial, EDT

Sala de Grabación

Frecuencia (Hz)	*EDT medido (s)*	*EDT simulado (s)*	*Error (%)*
125	1,39	1,38	0,21%
250	1,19	1,00	8,68%
500	1,12	1,20	-3,53%
1000	1,44	1,70	-8,35%
2000	1,97	1,97	0,08%
4000	1,63	1,60	0,98%
8000	1,15	1,10	2,41%
16000	0,58	0,50	7,10%
		EDT_{mid}	
		Error (%) = 6,30	

Tabla 18. Valores de EDT (s) medido vs simulado en sala de grabación.

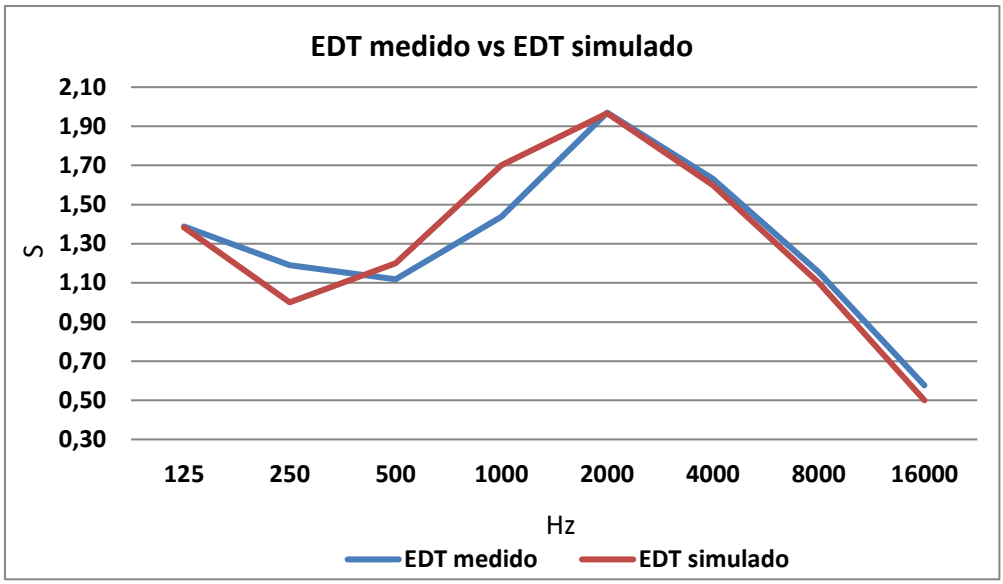


Figura 97. EDT (s) medido vs simulado en sala de grabación con predicción.

Las bandas de frecuencia 250, 1000 y 16000 Hz se encuentran por encima del umbral subjetivo, pero el error no supera el 10 %, por lo que se considera una buena simulación del EDT.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	*EDT medido (s)*	*EDT simulado (s)*	*Error (%)*
125	1,57	1,50	2,42
250	0,89	1,30	-18,82
500	1,30	1,40	-3,87
1000	1,33	1,60	-9,31
2000	1,83	1,90	-1,90
4000	1,63	1,60	1,03
8000	1,18	1,13	2,14
16000	0,54	0,55	-0,86
		EDT_{mid}	
		Error (%) = 6,59 %	

Tabla 19. Valores de EDT medido vs simulado en sala de control.

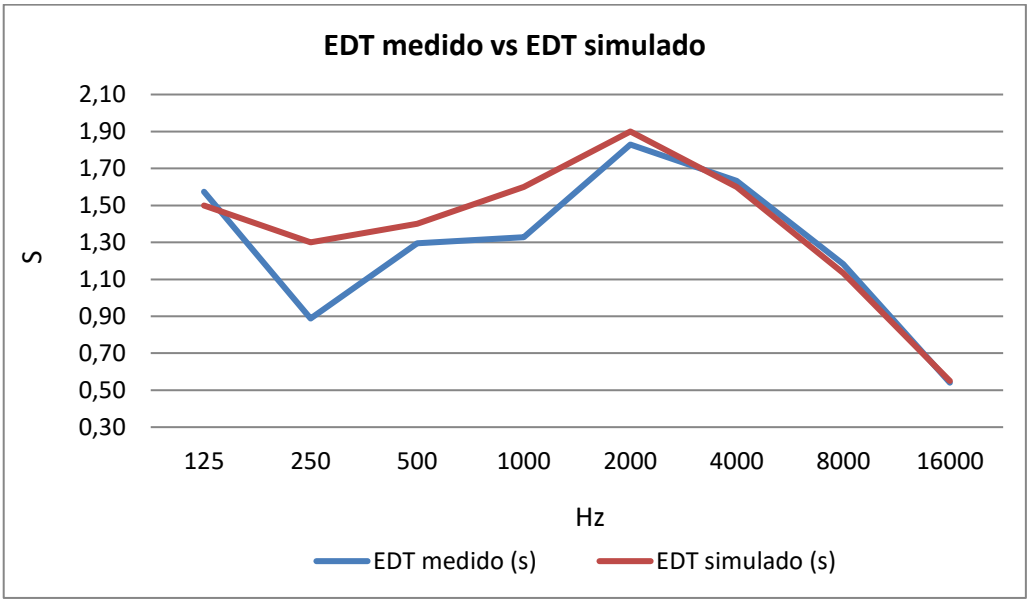


Figura 98. EDT (s) medido vs simulado en sala de control con predicción.

El error del EDT_{mid} está por debajo del umbral doble recomendado y se puede considerar una simulación buena. Las bandas de frecuencia de 250 y 1000 Hz se encuentran por encima del umbral subjetivo, sobrepasando los límites recomendados. Esto es debido a que en el tiempo de caída temprano (EDT) aún no se ha perdido toda la energía de la sala y, por lo tanto, una mayor absorción provocada por los materiales.

6.2.2.3 Definición, D50

Sala de Grabación

Frecuencia (Hz)	*D50 (s) medido*	*D50 (s) simulado*	*Error (%)*
125	0,38	0,40	-3,26%
250	0,55	0,52	2,91%
500	0,50	0,45	5,75%
1000	0,41	0,33	10,08%
2000	0,31	0,31	0,66%
4000	0,34	0,37	-3,30%
8000	0,50	0,48	2,30%
16000	0,74	0,76	-1,32%
		$D50_{mid}$	
		Error (%) = 7,65	

Tabla 20. D50 (%) medido vs simulado en sala de grabación con TUCT.

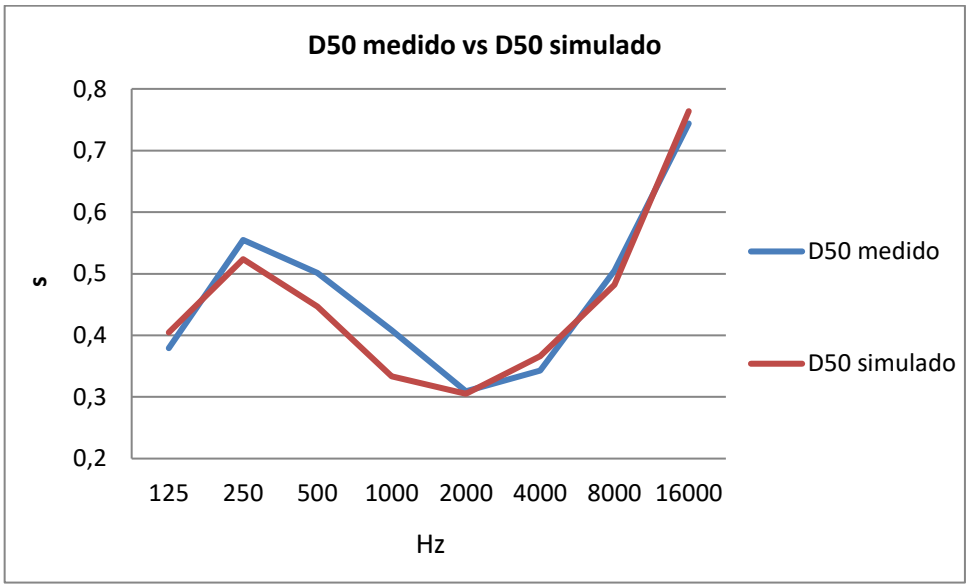


Figura 99. D50 (s) medido v simulado en sala de grabación con TUCT.

Se obtiene un error máximo en la banda de 1000 Hz del 10 %. El valor medio $D50_{mid}$ tiene un error del 7,65 %, por lo que se considera una buena simulación.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	*D50 medido (s)*	*D50 simulado (s)*	*Error (%)*
125	0,34	0,39	-6,95
250	0,54	0,43	11,51
500	0,42	0,41	2,16
1000	0,37	0,36	1,74
2000	0,33	0,33	-0,29
4000	0,37	0,37	-0,78
8000	0,48	0,48	-0,08
16000	0,78	0,74	2,23
		$D50_{mid}$	
		Error (%) = 1,95 %	

Tabla 21. D50 (s) medido vs simulado en sala de control con TUCT.

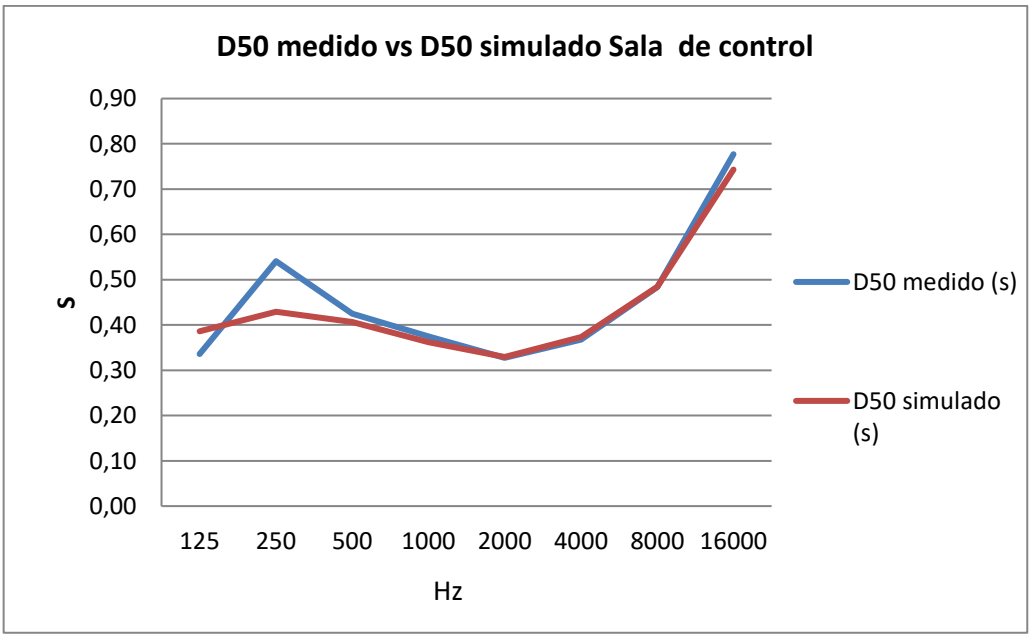


Figura 100. D50 (s) medido v simulado en sala de control con TUCT.

En la banda de frecuencia de 250 Hz se aprecia un error del 11,51 % que supera el doble del límite recomendado, aun así, el error medido de $D50_{mid}$ en la sala de control tiene un valor de 1,95%, por lo que se considera una excelente simulación.

6.2.2.6 Claridad de voz, C_{50}

Sala de Grabación

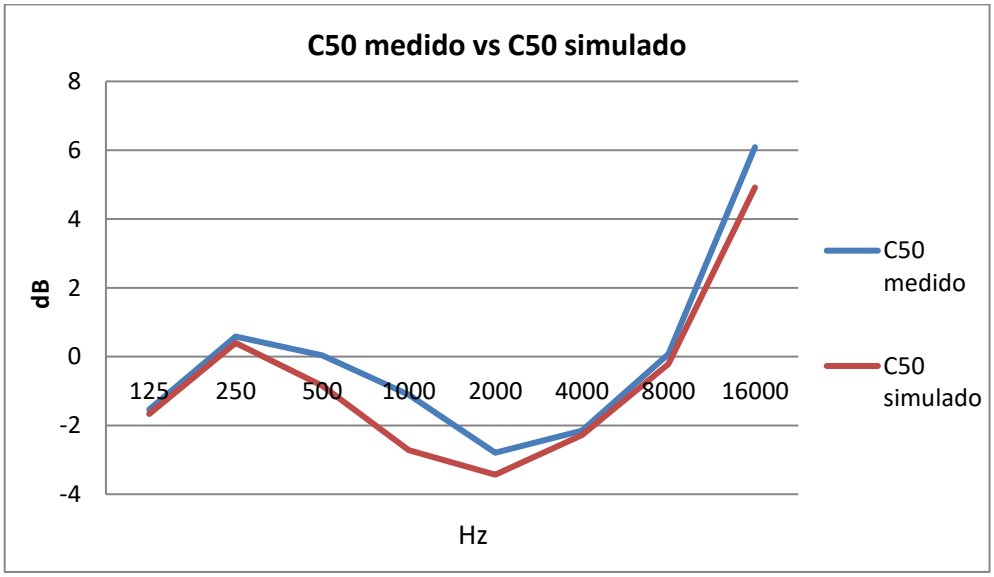


Figura 101. C50 (dB) medido v simulado en sala de grabación con TUCT.

Frecuencia (Hz)	***C50 (dB) medido***	***C50 (dB) simulado***	***Error (dB)***
125	-1,54	-1,67	0,13
250	0,58	0,40	0,18
500	0,04	-0,85	0,89
1000	-1,11	-2,72	1,61
2000	-2,79	-3,43	0,64
4000	-2,15	-2,28	0,13
8000	0,07	-0,22	0,29
16000	6,09	4,92	1,17
		$C50_{mid}$	
		Error (%) = 1,25	

Tabla 22. C50 (dB) medido vs simulado en sala de grabación con TUCT.

Se cumple para todas las bandas de frecuencia menos en 1 y 16 kHz con valores de 1,61 dB y 2,83 dB respectivamente. El error del C_{50} en frecuencias medias es de 1,23 dB, sobrepasando el límite recomendado, pero sin superar el valor doble, por lo que se considera una simulación buena.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	***C50 medido (dB)***	***C50 simulado (dB)***	***Error (dB)***
125	-2,27	-2,00	-0,27
250	0,44	-1,23	1,68
500	-0,89	-1,65	0,76
1000	-1,61	-2,47	0,85
2000	-2,43	-3,08	0,65
4000	-1,72	-2,25	0,53
8000	-0,16	-0,18	0,02
16000	6,31	4,62	1,69
		$C50_{mid}$	
		Error (%) = 0,81	

Tabla 23. C50 (dB) medido vs simulado en sala de control con TUCT.

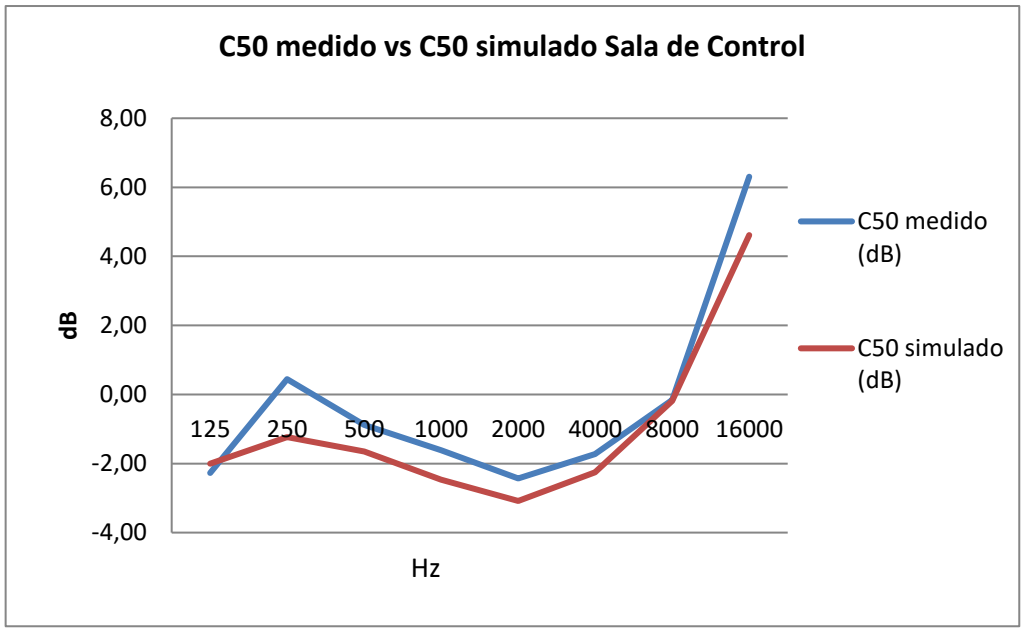


Figura 102. C50 (dB) medido v simulado en sala de control con TUCT.

6.2.2.4 Claridad musical, C_{80}

Sala de Grabación

Frecuencia (Hz)	*C80 medido*	*C80 simulado*	*Error (dB)*
125	1,58	0,93	0,65
250	4,00	3,42	0,58
500	2,98	1,97	1,02
1000	1,05	-0,38	1,43
2000	-0,83	-1,05	0,22
4000	-0,18	0,32	-0,50
8000	2,47	2,60	-0,13
16000	8,53	9,25	-0,72
		$C80_{mid}$	
		Error (dB) = 1,23	

Tabla 24. C80 (dB) medido vs simulado en sala de grabación con TUCT.

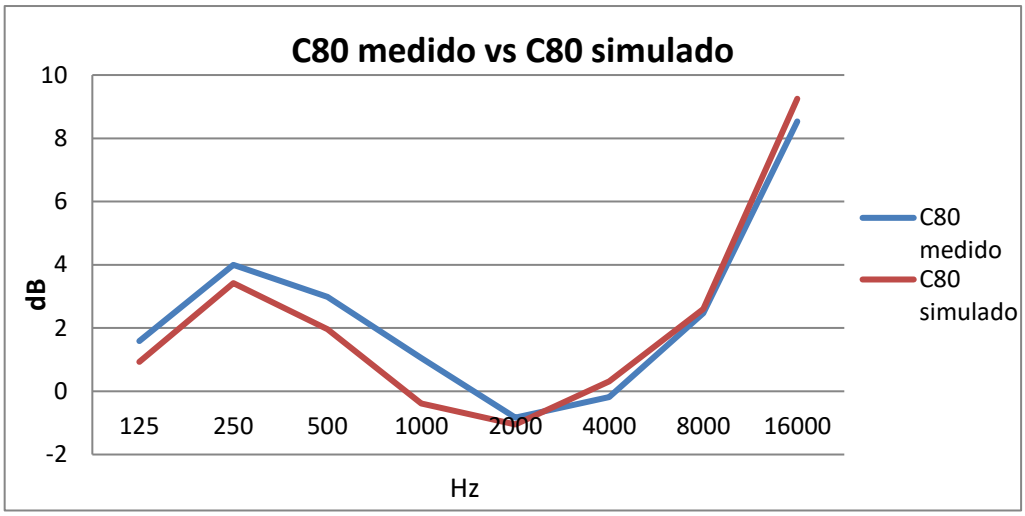


Figura 103. C80 (dB) medido v simulado en sala de grabación con TUCT.

La diferencia de claridad musical entre los valores simulados y medidos para la mayoría de bandas de octava están por debajo del margen de 1 dB, menos en la banda de frecuencias medias de 500 y 1000 Hz con un error medio de 1,23 dB. Aun así, no superando el doble del valor recomendado se puede considerar una buena simulación.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	*C80 medido (dB)*	*C80 simulado (dB)*	*Error (dB)*
125	0,00	1,20	-1,20
250	4,68	1,50	3,18
500	1,87	1,02	0,85
1000	0,87	0,13	0,73
2000	-0,68	-0,67	-0,02
4000	0,25	0,33	-0,08
8000	2,32	2,50	-0,18
16000	8,97	8,55	0,42
		$C80_{mid}$	
		Error (%) = 0,79	

Tabla 25. C80 (dB) medido vs simulado en sala de control con TUCT.

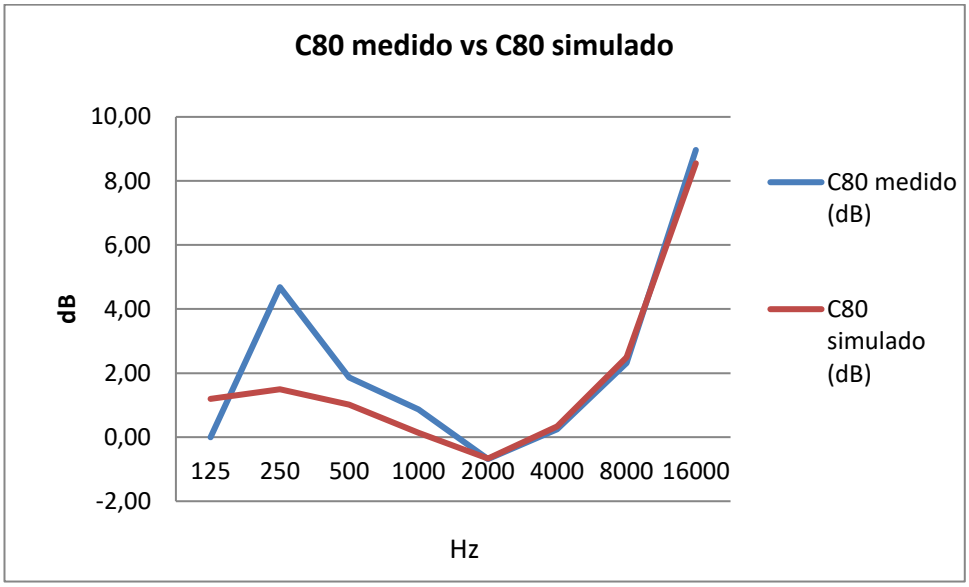


Figura 104. C80 (dB) medido vs simulado en sala de control con TUCT.

La diferencia de claridad de musical en la sala de control entre los valores simulados y medidos para la mayoría de bandas de octava están por debajo del margen de 1 dB, menos en la banda de frecuencias graves de 125 y 250 Hz con un error de 1,20 y 3,18 dB. El error medio calculado es 0,79 dB, por lo tanto, se considera una excelente simulación.

6.2.2.4 Índice de Transmisión del Habla, STI

Sala de Grabación

	M1	*M2*	*M3*	*M4*	*M5*	*M6*	*Promedio*
STI medido	0,550	0,560	0,540	0,520	0,530	0,550	0,542
STI simulado	0,440	0,450	0,440	0,450	0,450	0,450	0,447
Error relativo	0,111	0,109	0,102	0,072	0,082	0,100	0,096

Tabla 26. STI medido vs simulado en sala de grabación mediante predicción TUCT.

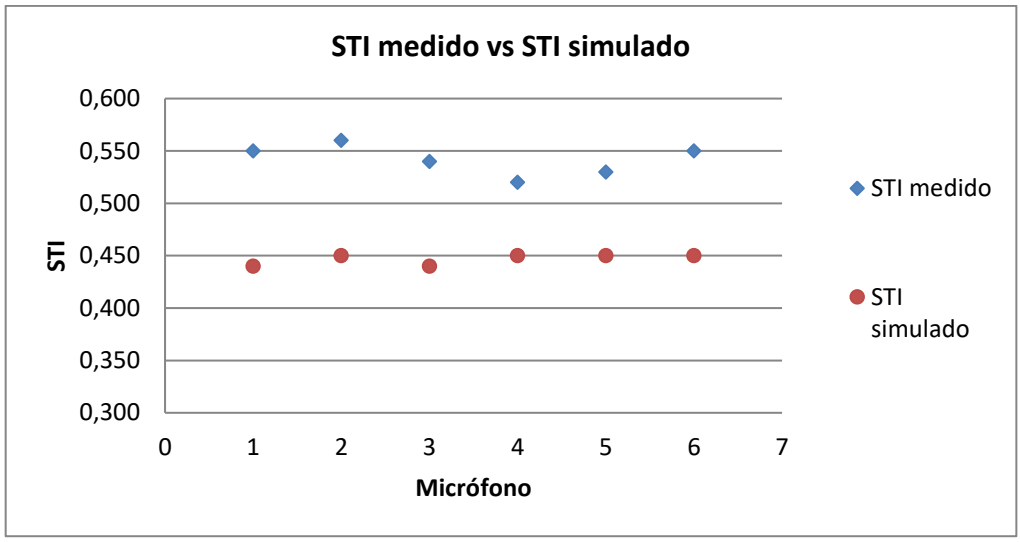


Figura 105, STI medido en sala de grabación mediante TUCT.

El umbral subjetivo es de 0,05. Como se aprecia en la tabla anterior los valores del STI se encuentran por encima de este valor, no superando el doble recomendado. Por lo que aun así se puede considerar como una simulación aceptable.

Sala de Control

	M1	***M2***	***M3***	***M4***	***M5***	***M6***	***Promedio***
STI medido	0,520	0,530	0,540	0,540	0,520	0,530	0,530
STI simulado	0,440	0,440	0,440	0,450	0,440	0,440	0,442
Error	0,083	0,093	0,102	0,091	0,083	0,093	0,091

Tabla 27. STI medido vs simulado en sala de control mediante predicción TUCT.

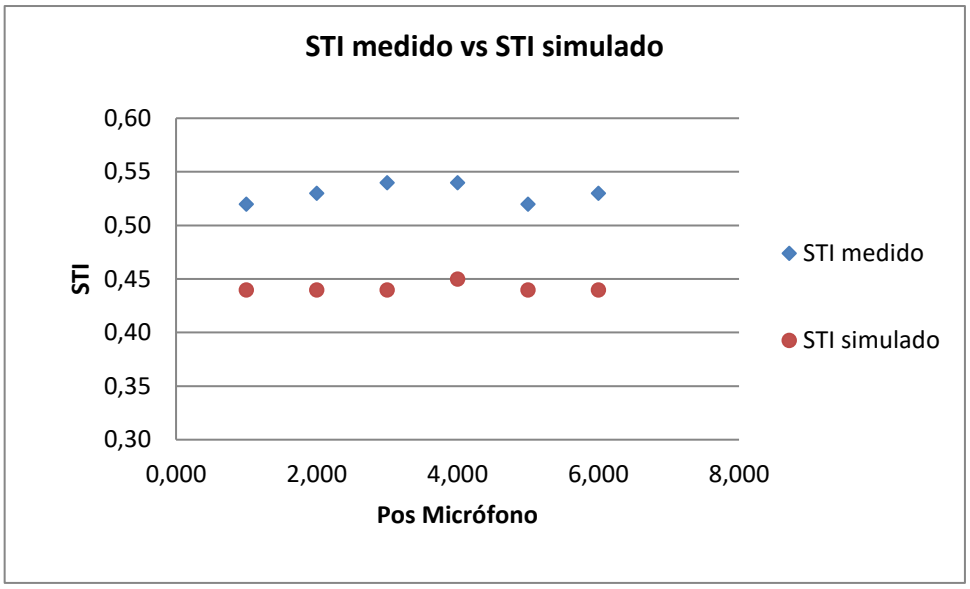


Figura 106. STI medido vs simulado en sala de control mediante predicción TUCT.

El error medio del STI es 0,091. Como se aprecia en la tabla anterior los valores del STI se encuentran por encima del umbral, no superando el doble recomendado. Por lo que aun así se puede considerar como una simulación aceptable.

6.3 Conclusiones

En resumen, analizando los valores obtenidos se puede afirmar que se tiene un modelo que nos va a dar resultados fiables sobre el comportamiento acústico del estudio de grabación.

En la mayor parte de los resultados analizados, vemos que el JND se encuentra dentro del umbral de valores recomendados, en los casos en los que sobrepasa este valor no llega a superar el valor doble. Por lo tanto, se puede considerar una simulación apta para realizar la propuesta de mejora acústica que se desarrolla en el siguiente capítulo.

7. PROPUESTA DE MEJORA ACÚSTICA MEDIANTE SIMULACIÓN.

7.1 Introducción.

Para el diseño de mejora acústica del estudio de sonido, se procede a una predicción del acondicionamiento acústico mediante una simulación en Catt Acoustic V9.1b.

Esta predicción se realizará agregando materiales absorbentes de distintos coeficientes de absorción, de tal manera que se consiga reducir el tiempo de reverberación medio y obtener un valor de aproximadamente unos 0.25 segundos. Un valor adecuado para estudios de sonido, sobre todo para salas de control donde se quieren evitar los ecos y las altas amplitudes de reflexiones indirectas.

La simulación de la sala de control se basa en una metodología de diseño LEDE, caracterizada en una alta cantidad de absorción en las paredes laterales y frontal. Las reflexiones se redireccionan a la parte trasera de la sala para que un difusor propague el sonido proporcionalmente en todas las direcciones. Con ayuda del diseño de construcción non-rectangular previo, evitando paralelismo de superficies, se conseguirá redireccionar a la parte trasera fácilmente las reflexiones indirectas.

7.2 Caracterización del recinto.

Para cada parámetro se ha representado y comparado los valores obtenidos en la sala de grabación y control, en cada una de las 8 bandas de octava comprendidas entre 125 y 16 kHz. Los resultados se obtienen a partir de la simulación proporcionada por el programa Catt Acoustic, principalmente la herramienta de predicción y auralización TUCT.

En las siguientes figuras, se muestran las vistas en 3D del diseño y distribución de los materiales acústicos para la propuesta de mejora.

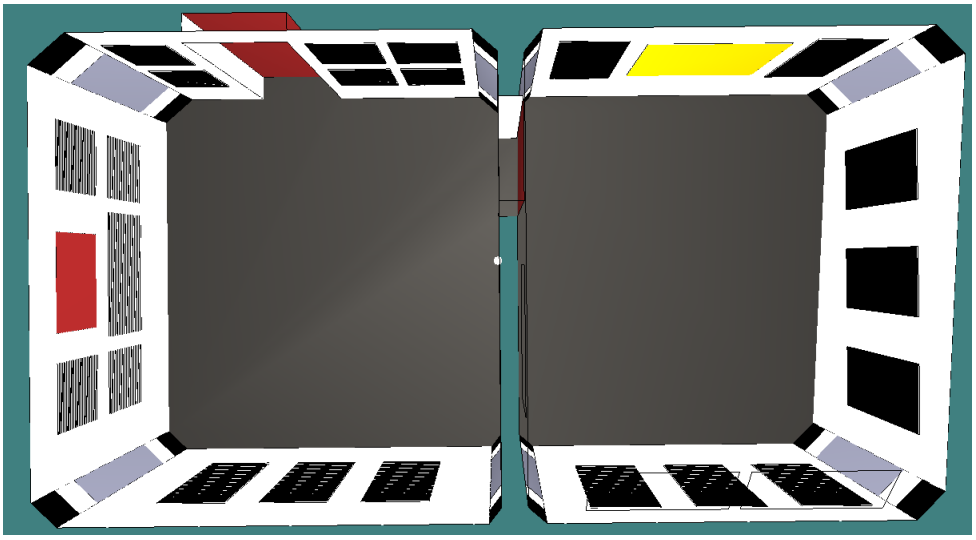


Figura 107. Vista en alzado 3-D del diseño de acondicionamiento acústico del estudio de sonido.

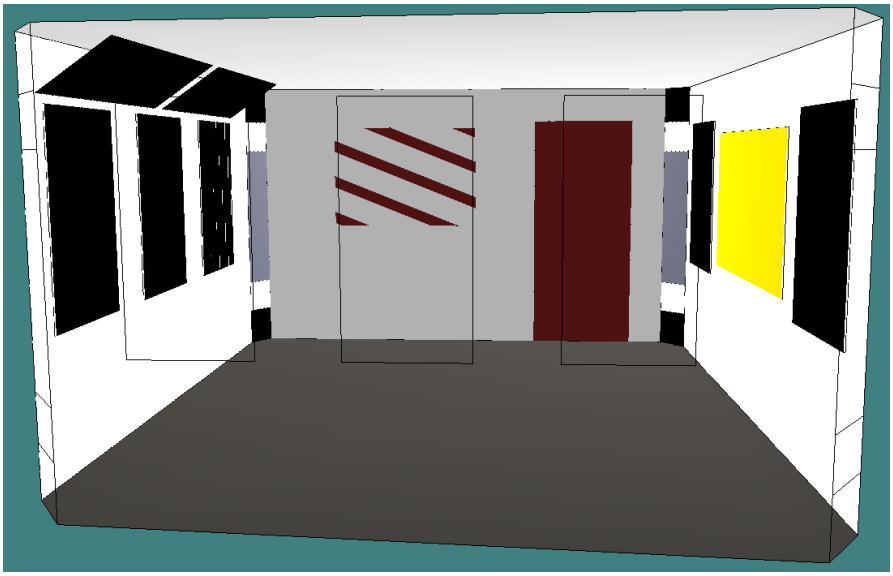


Figura 108. Vista en perfil 3-D del diseño de acondicionamiento acústico de la sala de control.

En primer lugar, se han agregado trampas de graves (negro) en las esquinas del estudio donde la presión sonora de estas frecuencias es mayor y así reducir la reverberación a dichas frecuencias. Para maximizar el efecto de reducción sonora en frecuencias graves, se han insertado en las paredes de las esquinas un material absorbente de baja frecuencia llamado Greus (gris).

Una vez conseguido la disminución en frecuencias graves, se ataca a las frecuencias medias y altas. Para ellos se insertarán paneles absorbentes (negro) en las paredes laterales y frontales, dejando espacio suficiente para no sobrecargar las salas puesto que se recomienda alrededor de un 40 % de ocupación de materiales absorbentes por cada pared. En las ventanas y puertas acústicas se han diseñado unas cortinas (rojo) que sustituirán el efecto de los paneles absorbentes. Para minimizar las reflexiones en el suelo y, por lo tanto, absorber sonido a frecuencias medias, se ha agregado una moqueta que también amortiguará el ruido a impactos producido, por ejemplo, por el bombo de la batería.

Finalmente, comentar el diseño de un difusor en la parte trasera de la sala de control (amarillo) que aporta cierto coeficiente de absorción y un valor alto en difusión a un tipo de frecuencia específica.

En la sala de grabación se ha optado por un diseño algo más sencillo ya que no tenemos esa necesidad de evitar las primeras reflexiones en el oyente, agregando por el momento paneles absorbentes que se podrán mover a conveniencia de la posición de los músicos.

En el *Anexo D* se describen los coeficientes de absorción de los diferentes materiales citados, los cuales han sido insertados en Catt Acoustic para el diseño de mejora acústica.

7.3 Resultados mediante predicción/Aura.

En este apartado se presentan los parámetros acústicos más relevantes obtenidos para el modelo de diseño como propuesta de mejora acústica y con la comparación de los valores obtenidos en el capítulo anterior.

7.3.1 T30

Las siguientes figuras representan mediante el módulo de Estimación del TR los valores del tiempo de reverberación simulados T_{30}, Eyring y Sabine junto al TR referencia para cada banda de octava comprendidas entre 125 Hz y 16 kHz.

Sala Grabación

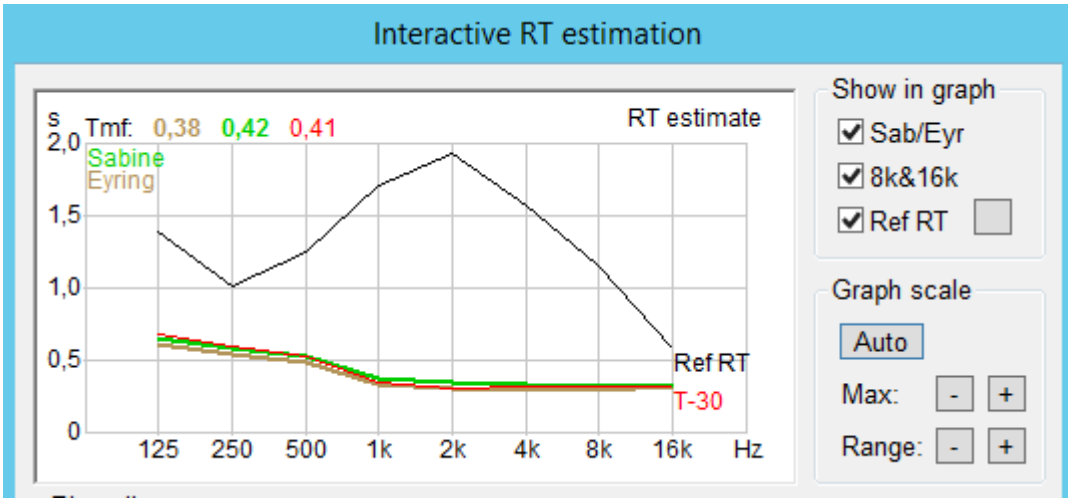


Figura 109. Gráfica de mejora del T30 mediante estimacion del TR en sala de grabación.

Frecuencia (Hz)	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
Promedio T30 (s) simulado	1,36	0,98	1,22	1,69	1,94	1,57	1,09	0,52
Promedio T30 (s) mejora	0,68	0,61	0,54	0,36	0,32	0,33	0,32	0,33
$T30_{mid}$ (s) mejora	0,45							

Tabla. Mejora T30 (s) en sala de grabación.

Sala de Control

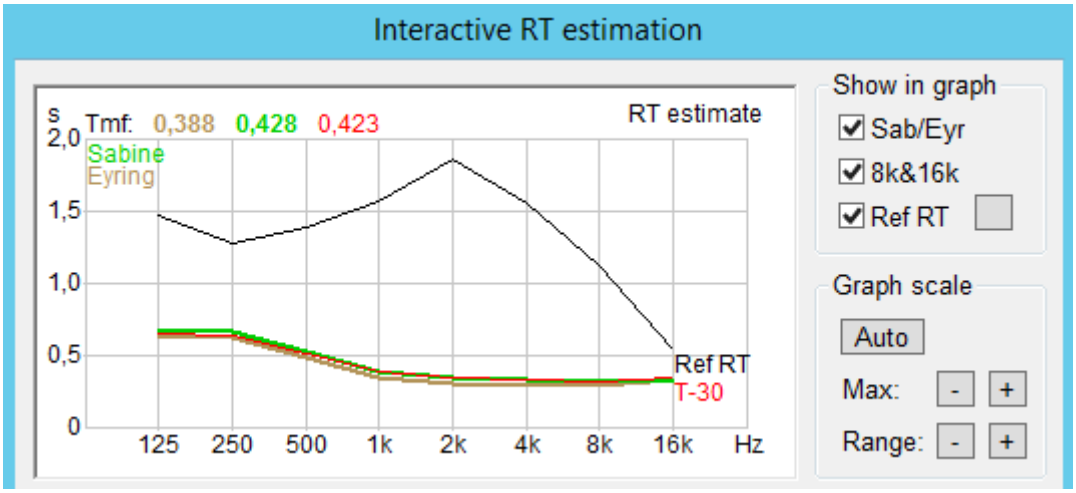


Figura 110. Gráfica de mejora del T30 mediante estimación del TR en sala de control.

Frecuencia (Hz)	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
T30 (s) simulado	1,48	1,28	1,40	1,58	1,87	1,56	1,13	0,55
T30 (s) mejora	0,67	0,65	0,53	0,39	0,35	0,33	0,32	0,36
$T30_{mid}$ (s)	**0,46**							

Tabla 28. Mejora T30 (s) en sala de control.

Según los datos obtenidos en la propuesta de mejora, con sala vacía tenemos un tiempo de reverberación medio de 0,45 segundos. Valor medio que disminuirá con la sala ocupada y por tanto cumplirá el umbral recomendado para

estudios de grabación, establecido en valores entre 0,2 - 0,4 segundos, reflejados en la tabla 2.

7.3.2 EDT

Sala de Grabación

Frecuencia (Hz)	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
Promedio EDT (s) simulado	1,38	1,00	1,20	1,70	1,97	1,60	1,10	0,50
Promedio EDT (s) mejora	0,68	0,60	0,53	0,35	0,30	0,30	0,30	0,32
EDT_{mid} (s)	0,44							

Tabla 29. Mejora EDT (s) en sala de grabación.

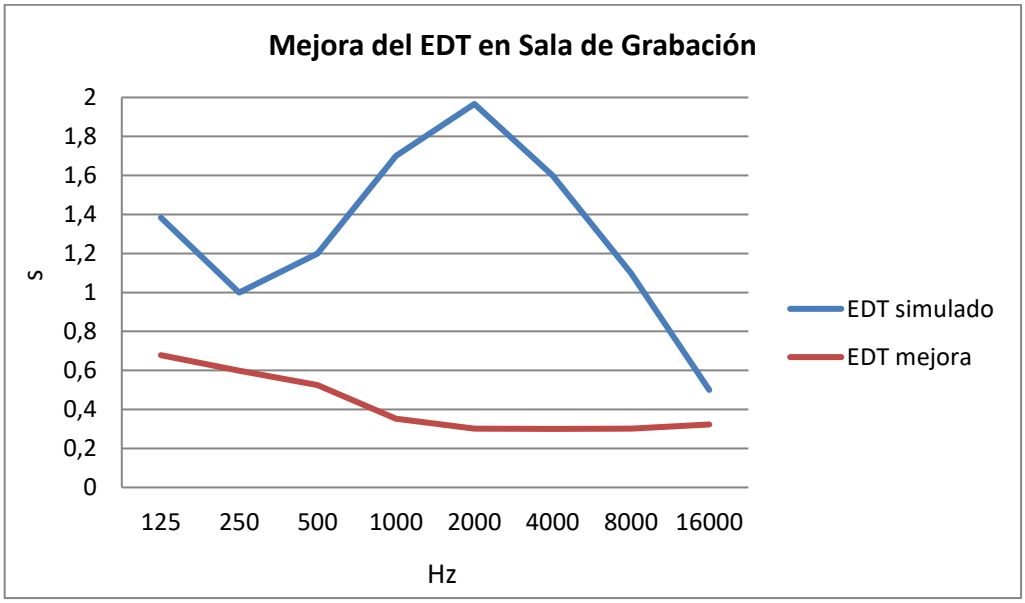


Figura 111. EDT (s) y T30 (s) simulado vs mejorado mediante predicción TUCT en sala grabación.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***
EDT (s) simulado	1,50	1,30	1,40	1,60	1,90	1,60	1,13
EDT (s) mejora	0,65	0,64	0,51	0,37	0,33	0,31	0,30
EDTmid (s) mejora	0,44						

Tabla 30. Mejora EDT (s) en sala de control.

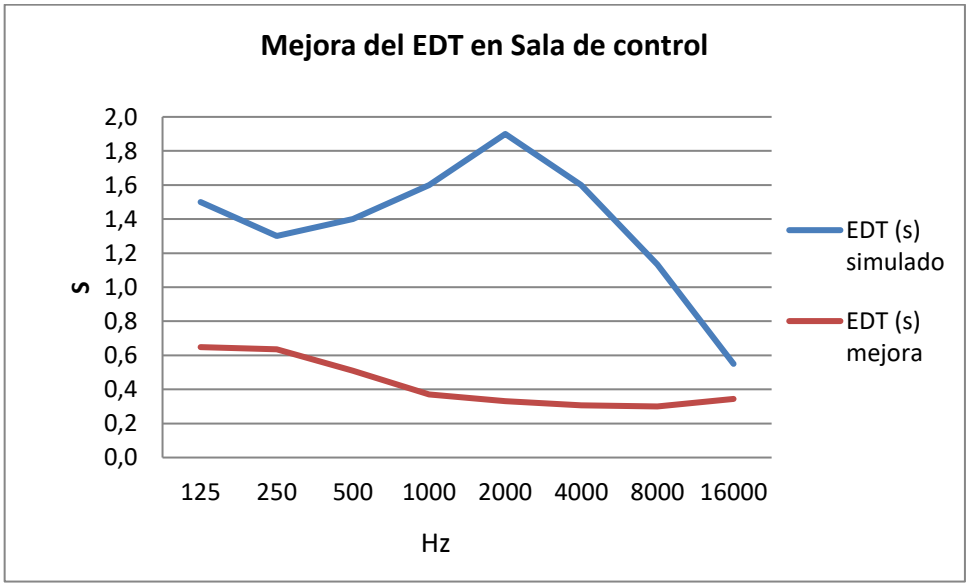


Figura 112. EDT (s) simulado vs mejorado mediante predicción TUCT en sala de control.

7.3.3 Definición, D-50

En la siguiente gráfica se recogen los valores para cada banda de frecuencia de parámetro acústico de definición, D_{50}, con el diseño de mejora de acondicionamiento acústico.

Sala de Grabación

Frecuencia (Hz)	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
Promedio D50 (s) simulado	0,40	0,52	0,45	0,33	0,31	0,37	0,48	0,76
Promedio D50 (s) mejora	0,65	0,68	0,74	0,87	0,90	0,91	0,91	0,89
$D50_{mid}$ (s) mejora	0,82							

Tabla 31. Mejora D50 (s) en sala de grabación.

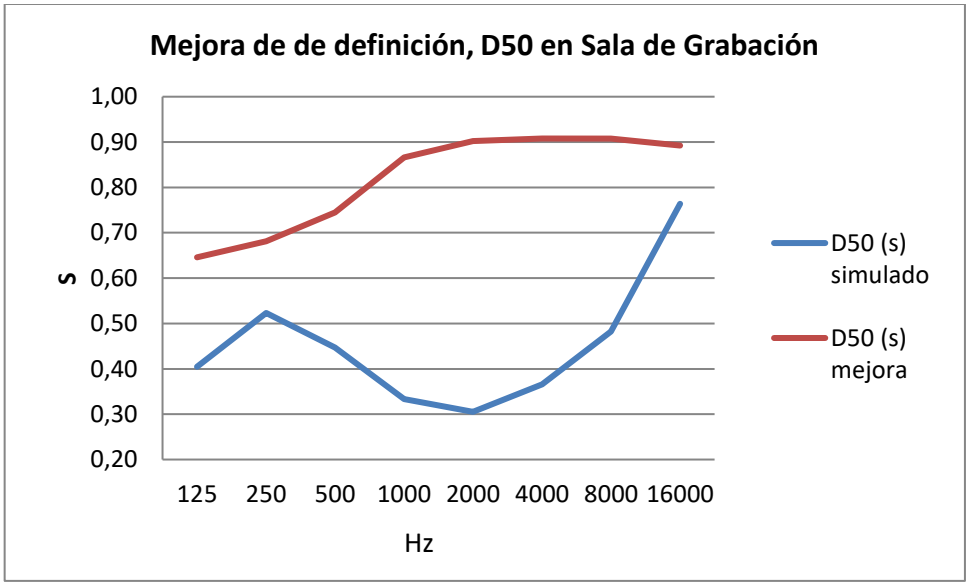


Figura 113. D50 (s), comparativa mejora mediante predicción TUCT en sala grabación.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
D50 (s) simulado	0,39	0,43	0,41	0,36	0,33	0,37	0,48	0,74
D50 (s) mejora	0,67	0,68	0,75	0,85	0,89	0,89	0,91	0,88
D50mid (s)	0,80							

Tabla 32. Mejora D50 (s) en sala de control.

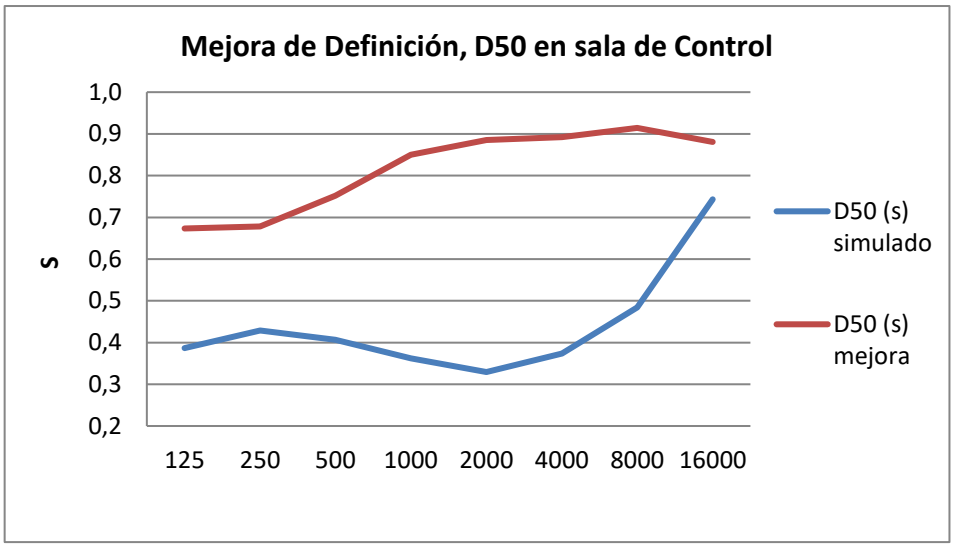


Figura 114. Gráfica comparativa del diseño de mejora D-50.

Se puede observar una mejora significativa, llegando a obtener un valor medio del 80% gracias al diseño de materiales absorbentes que evitan el alto número de reflexiones despues de los 50 ms.

5.4.3.4 Claridad de voz, C_{50}

Sala de Grabación

Frecuencia (Hz)	*125*	*250*	*500*	*1000*	*2000*	*4000*	*8000*	*16000*
Promedio C50 (dB) simulado	-1,67	0,40	-0,85	-2,72	-3,43	-2,28	-0,22	4,92
Promedio C50 (dB) mejora	2,58	3,67	4,67	8,13	9,68	9,97	9,92	9,18
Speech Average (dB) mejora	8,61							

Tabla 33. Mejora C50 (dB) en sala de grabación.

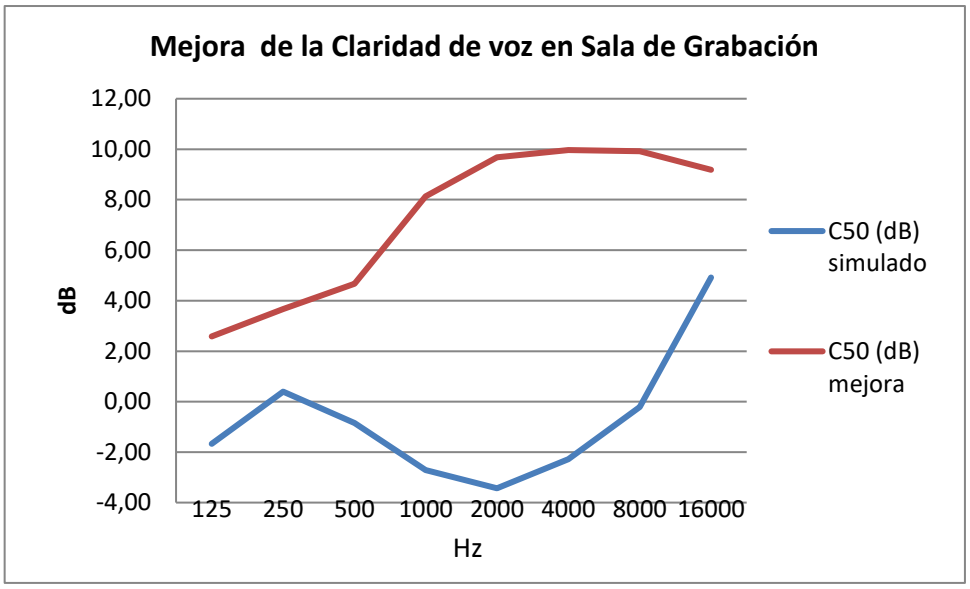


Figura 115. C50 (dB), comparativa mejora mediante predicción TUCT en sala grabación.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
C50 (dB) simulado	-2,00	-1,23	-1,65	-2,47	-3,08	-2,25	-0,18	4,62
C50 (dB) mejora	3,17	3,25	4,83	7,58	8,92	9,65	10,07	8,72
Speech Average (dB) mejora	8,15							

Tabla 34. Mejora C50 (dB) en sala de control.

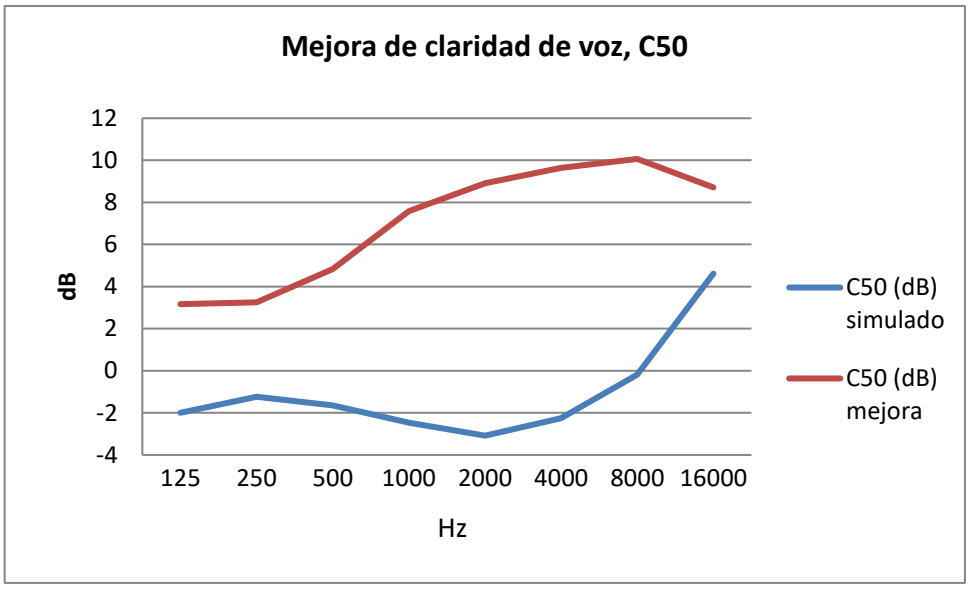


Figura 116. Gráfica comparativa del diseño de mejora C50 (dB).

Como podemos ver cumplimos con la condición de una aceptable inteligibilidad de la palabra con un $C50_{average}$ o Speech *Average* mayor a 2 dB. Cuanto más se supere el límite, mejor será la sonoridad y la inteligibilidad de la palabra en el punto considerado. [4]

5.4.3.5 Claridad musical, C80

En la siguiente gráfica se muestran los valores para cada frecuencia de la claridad musical, C_{80} de la sala de control con el diseño de mejora de acondicionamiento acústico.

Sala de Grabación

Frecuencia (Hz)	*125*	*250*	*500*	*1000*	*2000*	*4000*	*8000*	*16000*
Promedio C80 (dB) simulado	0,93	3,42	1,97	-0,38	-1,05	0,32	2,60	9,25
Promedio C80 (dB) mejora	6,22	7,45	8,80	13,62	15,67	15,92	15,72	14,92
Music Average (dB) mejora	12,69							

Tabla 35. Mejora C80 (dB) en sala de grabación.

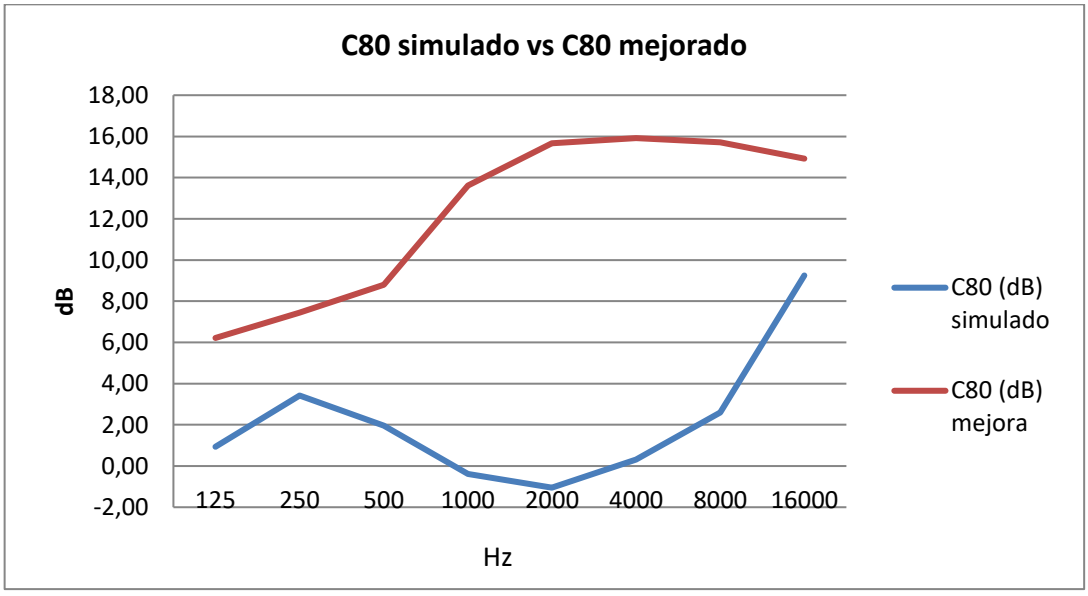


Figura 117. C80 (dB), comparativa mejora mediante predicción TUCT en sala grabación.

Sala de Control

Frecuencia (Hz)	*125*	*250*	*500*	*1000*	*2000*	*4000*	*8000*	*16000*
C80 (dB) simulado	1,20	1,50	1,02	0,13	-0,67	0,33	2,50	8,55
C80 (dB) mejora	6,75	6,92	9,07	12,77	14,45	15,50	15,95	14,13
"Music Average" mejora	12,09	dB						

Tabla 36. Mejora C80 (dB) en sala de control.

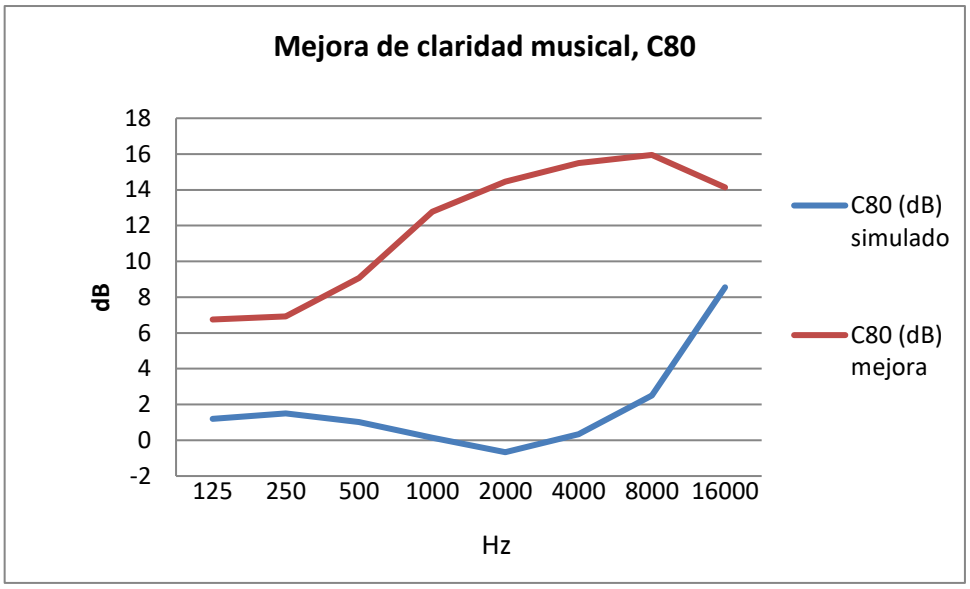


Figura 118. Gráfica comparativa del diseño de mejora C80 (dB).

Para instrumentos electrónicos, se recomiendan valores entre 4 y 12 dB para sala vacía. Los valores obtenidos se encuentran en el rango de valores recomendados para una excelente claridad musical, superado incluso en algunas bandas de octavas.

5.4.3.6 STI

En las siguientes tablas y gráficas se muestran los valores obtenidos del STI para la propuesta de mejora acústica y la comparativa con las salas sin acondicionar en el estudio de grabación.

Sala de Grabación

	M1	*M2*	*M3*	*M4*	*M5*	*M6*	*Promedio*	*Valoración*
STI simulado	0,55	0,56	0,54	0,52	0,53	0,55	0,54	***Aceptable***
STI mejora	0,69	0,70	0,69	0,68	0,69	0,69	0,69	***Buena***

Tabla 37. Comparativa de valoraciones del STI.

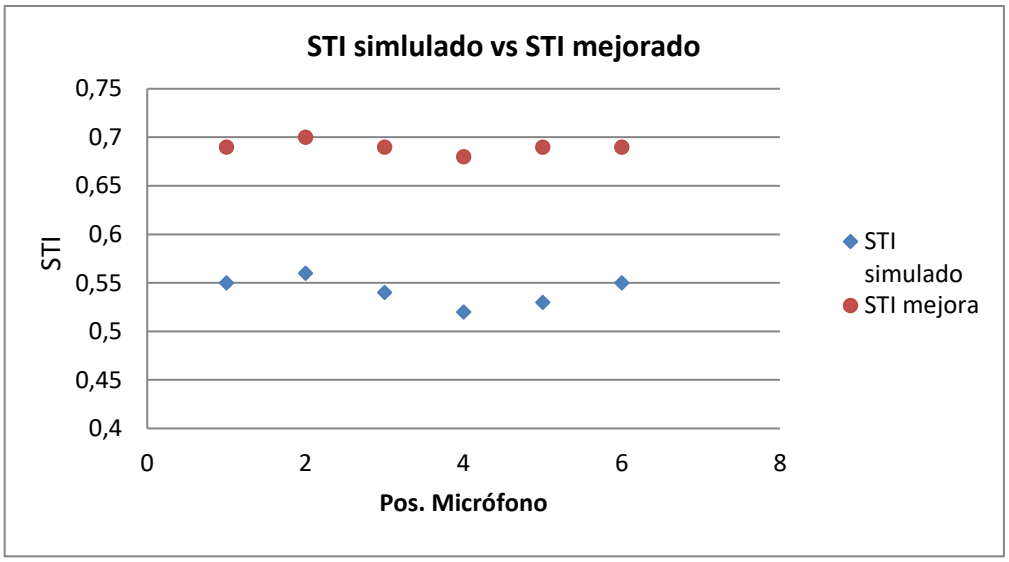


Figura 119. Gráfica comparativa de la valoración del STI.

Sala de Control

	M1	*M2*	*M3*	*M4*	*M5*	*M6*	*Promedio*	*Valoración*
STI simulado	0,44	0,44	0,44	0,45	0,44	0,44	0,44	**Aceptable**
STI mejora	0,67	0,67	0,67	0,67	0,65	0,66	0,67	**Buena**

Tabla 38. Mejora del STI en sala de control.

8. SONORIZACIÓN DEL ESTUDIO DE GRABACIÓN

8.1 Introducción

La finalidad de este capítulo es desarrollar el tipo de instalación de audio que va a ser instalada en el estudio de grabación de la Escuela Politécnica de Cáceres. El objetivo es aumentar el aprendizaje dentro de un aérea concreta de audio como son los estudios de grabación musical.

En primer lugar, se hará un análisis de los diferentes equipos necesarios para realizar grabaciones musicales, monitorización y producción.

Tras la comprensión de los diferentes equipos, estos deberán interconectarse. Se elegirán los distintos tipos de cables y conectores, tanto analógicos como digitales.

Finalmente se procederá a realizar el conexionado anotando mediante tablas y diagramas las entradas/salidas de los diferentes patch pannel y equipos de sonido.

8.2 Equipamiento

A continuación, se procede a resumir el funcionamiento de los distintos equipos de sonido a instalar en el estudio de grabación musical. Estas definiciones se han realizado gracias a la lectura previa del proyecto *"Diseños de equipamiento de un estudio de grabación musical"* [27].

8.2.1 Preamplificador de micrófono

Un preamplificador o previo de micrófono es un elemento que se encarga de adecuar el nivel de señal procedente de un micrófono al rango de niveles de trabajo del resto de los equipos, o de los propios convertidores analógico-digital. Esto se debe a que la señal que produce un micrófono tiene un nivel demasiado bajo para trabajar con él, de ahí que necesite una amplificación previa a su grabación o procesado para llevarla a un nivel con el que poder trabajar dentro de un estudio de grabación.

La mayoría de grabaciones se llevan a cabo instrumento tras instrumento, pero hay que tener en cuenta que algunas de ellas se realizan con todos los instrumentos a la vez, con un resultado más realista a la grabación. Un ejemplo de un alto número de micrófonos a utilizar en una grabación puede ser con 8 para batería genérica, 3 para guitarras españolas y 4 tomas para banda completa de jazz. Todo esto conforma una cantidad de canales de entrada de entre 10 y 15.

La elección de preamplificadores será la siguiente, dando lugar a un total de 16 canales.

- Banco de previos de 8 canales
- Banco de previos de 4 entradas
- Previo bi-canal

8.2.2 Interfaces de audio

Para que todos los equipos puedan comunicarse con la DAW (Digital Audio Workstation), son necesarias una puerta de entrada y una puerta de salida para la señal de audio. Para ello existen tarjetas PCI y equipos externos al ordenador que realizan esta función, como tarjetas PCI (interconexión de componentes periféricos) externas, mesa de mezclas digitales FireWire o USB.

El diseño del equipamiento está preparado para trabajar con dos tipos de señales de datos, datos de audio y señales de datos MIDI. Por lo que se ha elegido dos tipos de interfaces diferentes, audio y MIDI.

El fin del interfaz de audio es recoger las señales digitales procedentes de los previos de micrófono y suministrar las señales de salida de la DAW a los diferentes equipos de monitorización, como el amplificador de auriculares y el centro de control de monitores. Lo mismo ocurre con la interfaz MIDI, la cual es la encargada de comunicar los equipos MIDI con el ordenador.

Para elegir las interfaces de audio se han contabilizado las entradas y salidas necesarias de los equipos que van a ir interconectados con ella.

- 5 entradas ópticas para las salidas de previos de micrófono. Digitales.
- 2 salidas para entradas del centro de control de monitores. Mono Analógicas
- 2 salidas para entradas del amplificador de auriculares. Mono analógicas
- Canales para líneas de foldback o monitorado diferentes.

El tipo de interfaces de audio que se está analizando, poseen un banco de conexiones analógicas de 8 canales entrada/salida. Existen numerosos fabricantes

de interfaces de audio USB/FireWire, se ha optado por la elección del 828 MKII Híbrido.

Las interfaces MIDI con bancos de puertos MIDI de entrada y salida que forman una matriz de conmutación, suelen disponer de 8 canales entrada/salida y permiten dirigir una o varias entradas a una o varias salidas mediante un software por ordenador.

8.2.3 Ordenador

El ordenador será el corazón del equipamiento del estudio, fuente y destino de todas las señales que pasen por la cadena de audio que se está diseñando. Es el equipo que da soporte físico a la DAW, el núcleo desde donde se realicen las tareas mediante software, de grabador multipista, editor de audio/midi, ejecutor de módulos de sonido, ecualizadores, procesadores de efectos y dinámica de la señal, etc.

A continuación, se mencionan algunos componentes del ordenador básico que entra en juego a la hora de realizar la producción musical.

- Procesadores
- RAM
- Unidad de almacenamiento
- Puertos USB

8.2.4 Micrófonos

Los micrófonos son transductores electroacústicos receptores. Convierten las señales acústicas en señales eléctricas, para permitir así el registro, almacenamiento, procesamiento y transmisión de las señales de audio. Son un elemento imprescindible y muy importante dentro del proceso de grabación sonora. Constituyen el primer componente de la toma de sonido.

No existe el micrófono ideal, debido a la sencilla razón de que no hay un único ambiente acústico o un único tipo de música. Es por ello que el ingeniero de sonido debe tener a su disposición una amplia gama de micrófonos, pudiendo elegir en función de cada caso. Las características más importantes son la sensibilidad, respuesta en frecuencia, impedancia de salida y directividad.

A nivel de estudio, los micrófonos se clasifican en dos tipos en función del tipo de transductor: dinámicos y de condensador. Los dinámicos son los más utilizados para captar fuentes próximas con una alta presión sonora y con mucho contenido en frecuencias graves (amplificadores, bombo, caja). Al tener menos sensibilidad que los micrófonos de condensador, captan menos detalles de los instrumentos al ser tocados. Los micrófonos de condensador, por su mayor sensibilidad y una respuesta en frecuencia plana los hace perfectos para grabar voces, instrumentos de cuerda o viento y el ambiente de la batería con la máxima calidad y nitidez.

La elección de micrófonos se ha basado en la posibilidad de grabaciones en directo, por lo que se tiene que tener una gran variedad de micrófonos y variedad entre ellos. Un micrófono dinámico para bombo, tres para timbales, dos de

condensador para sonido aéreo, charles, contrabajo, dinámico o de condensador para amplificador de guitarra, para voz, trompeta y saxofón.

8.2.5 Monitorización

8.2.5.1 Monitores

Son transductores que transforman la energía eléctrica en energía acústica. Son los encargados de generar la señal de mezcla que se esté llevando a cabo.

En los estudios de grabación profesional, se hace uno de altavoces de bobina móvil de radiación directa. Estos van montados en cajas acústicas, las cuales hacen una gran función.

La elección de monitores se realiza según las dimensiones de la sala de control, en este caso se ha optado por monitores de campo cercano. La misión de estos monitores es que el operador escuche la señal directa que generan. Se sitúan a muy poca distancia del mismo, normalmente tras la mesa de control y a la altura de sus oídos. Los monitores de campo cercano deben tener una disposición con respecto al operador, como la especificada a continuación:

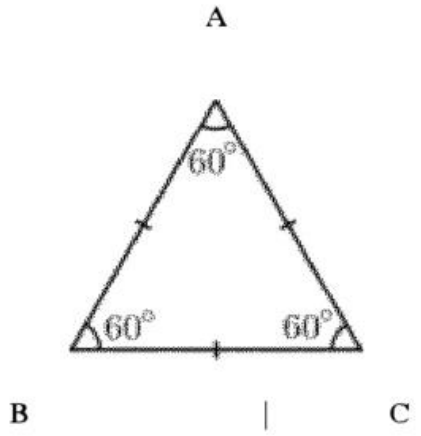


Figura 120. Disposición de los monitores de campo cercano.

Siendo “A” el operador y “B, C” los canales R, L del monitor respectivamente.

En el estudio de grabación hay otra pareja de monitores en un sistema de PA en la sala de grabación (Sala A). El motivo es poder crear una producción, que suene correctamente en cualquier sistema de reproducción, ya sea h-fi, monitores de ordenador, con la finalidad de que un técnico se haga una idea de cómo sonará en cada caso.

8.2.5.2 Centro de control de monitores

Los centros de control de monitores son equipos que, principalmente realizan un direccionamiento de señales provenientes de diferentes fuentes, a los monitores acústicos dentro de un estudio de grabación. Son la etapa intermedia dentro de la cadena de audio, punto medio entre las interfaces y las escuchas. Necesarios para evitar reconfigurar cableado en el caso de cambiar de fuente acústica de salida.

Poseen número de bancos de entradas y salidas estéreo, para realizar los direccionamientos. También incorporan la opción de insertar líneas de monitorado proveniente de la DAW, y posterior envío a los amplificadores de los auriculares.

8.2.5.3 Amplificador de auriculares

Los amplificadores de auriculares dan la entrada a los auriculares de los artistas para poder escuchar la mezcla ya grabada y su propia señal generada en directo y así poder sumar a la mezcla la pista de su instrumento.

En el caso de una toma de directo, deben disponer del conjunto de señales de las tomas microfónicas para poder realizar la pieza musical, escuchando realmente lo que están grabando. Para ellos es necesario direccionar desde la DAW una o varias señales estéreo de foldback a los auriculares de dichos artistas.

8.2.5.4 Auriculares

Se utilizan con dos objetivos, la escucha del foldback o monitorado y la posible mezcla en algunas ocasiones.

Los auriculares de estudio suelen ser de forma circumaural. Existen dos tipos disponibles en el mercado: auriculares semiabiertos o cerrado. Los auriculares semiabiertos están destinados a la sala de grabación para la mezcla y los auriculares cerrados para el caso de foldback.

8.2.6 Generador de reloj

Una de las partes más importantes en u estudio de grabación es la señal de sincronización. Cuando se digitaliza la señal analógica de audio se hace a una frecuencia de muestreo, creando una señal discreta. Todos los equipos que trabajen con señales de audio digitales tienen que estar sincronizados para que las muestras sean procesadas y enviadas de un equipo a otro correctamente.

8.2.7 Patch Pannel

El patch pannel es un dispositivo conmutador, al que se le puede conectar o soldar por la parte posterior todas las entradas y salidas de los equipos con los que se encuentra en un estudio. En la parte frontal dispone de numerosos conectores hembra, que permiten la interconexión mediante latiguillos en los diferentes dispositivos. Con ellos se evita la multitud de conexiones y desconexiones físicas de entra y salida de los dispositivos, evitando perdida de tiempo y siendo fácil la monitorización y reconfiguración. A continuación, podemos ver el ejemplo de un patch pannel.

Figura 121. Ejemplo de Patch pannel.

La función de separadores de equipos consigue evitar los lazos de masa que será uno de los problemas que posee la instalación de audio.

Existen diferentes tipos de patch pannel:

- Según el tipo de señal: Para señales de video, audio analógico o digital, para señales MIDI …
- Según el tipo de conectores: RCA, TRS balanceado o no balanceado, con conectores tipo Bantam (balanceados)

Cada Jack o punto del patch panel posee un tipo de conexión, pudiendo normalizar las líneas de transmisión. Existen cuatro tipos de conexiones.

- **FULL–Normalled**. Completamente normalizada, ya que la hilera de arriba está completamente conexionada con la de abajo.
- **HALF-Normalled Bottom.** Cuando insertamos un cable de pacheo o latiguillo en la hilera de arriba, esta sigue transmitiéndose a la hilera de abajo.
- **Half-Normalled Top.** Similar a la anterior, pero con el condicionante de que está invertida la desconexión. Si conectamos un cable en la parte superior la normalización se rompe, dirigiéndose la señal a otra dirección. Y si se conecta en la parte inferior duplicamos la señal sin romper su destino.
- **Isolated.** No posee normalización. Las conexiones internas se encuentran abiertas, con la intención de poder direccionar las salidas de los equipos a las entradas que se quiera.

8.2.8 Wall Box

Para poder interconectar las señales entrantes y salientes de la sala de grabación, se hace uso de un *wall box.* Se trata de una caja que se sitúa en la pared del estudio y en la cual se encuentran los conectores de entrada/salida por los cueles se van a transmitir las señales.

En el caso de esta instalación, se va a proceder al diseño de un wall box personalizado, con los 48 espacios para la introducción de conectores. A continuación, se especifican los conectores que lo forman:

- 16 XLR hembra para tomas microfónicas
- 10 TRS no balanceado hembra para entradas de línea
- 12 TRS no balanceado hembra para salida de auriculares

Figura 122. Chasis wall box.

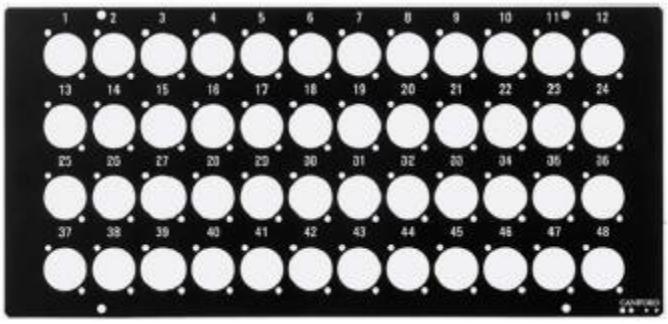


Figura 123. Panel frontal wall box.

8.3 Equipamiento auxiliar

En espete apartado se especifican una serie de equipos que, aunque no son totalmente imprescindibles (excepto las cajas de inyección) para realizar una grabación, se van a incluir en la instalación.

8.3.1 Superficie de control

Es un equipo controlado vía MIDI, que se utiliza en los estudios de grabación digitales, que permiten el control de la DAW como si fuera una mesa de mezclas. Con ella, se puede realizar un control sobre sus elementos interactivos. Suelen poseer un número de faders monitorizados, y los controles propios de una pista de audio. A continuación, en la siguiente figura se observa un ejemplo de superficie de control.

Figura 124. Superficie de control.

8.3.2 Teclado MIDI

Es un dispositivo controlador, también llamado teclado Master, que se utiliza para crear secuencias de una manera sencilla, sin necesidad de uso del ratón del ordenador y en tiempo real.

Realiza envíos de datos MIDI. Dentro de la DA se utilizan los diversos plug-ins disponibles para dar sonido a esas instrucciones. Pueden tener teclas tipo sintetizador o teclas tipo piano con simulación de pulsación de piano.

8.3.3 DSP FireWire

Los procesadores digitales de sonido (Digital Sound Processor) o DSP´s han tomado una importancia bestial en los últimos años. Basados en una arquitectura de computación, procesan el sonido emulando a sus antecesores analógicos, pero mejorando en versatilidad, ya que con un sólo dispositivo se pueden realizar múltiples trabajos que antes harían.

Para este estudio de grabación se ha optado por un DSP de mezcla líquida, Liquid MIX mostrado en la siguiente figura.

Figura 125. DSP firewire Liquid MIX. *(focusrite)*

Cada uno de los 32 canales de Liquid Mix ofrece emulaciones de compresores y EQs, seleccionadas de una variedad de clásicos vintage y modernos. Hay disponibles 40 tipos de compresores y 20 EQs, y la librería online está en expansión.

El DSP de Liquid Mix se presenta en una elegante carcasa de control de escritorio, que se conecta al ordenador vía Firewire y a su vez se alimenta del bus Firewire.

8.4 Mobiliario Workstation

El mobiliario donde irán dispuestos todos los equipos debe ser de tipo profesional, adaptable a la configuración del diseño.

Se ha procedido al diseño de un escritorio de estudios de grabación musical casero. Para este diseño se observaron diferentes tipos de escritorios hasta que se optó por imitar el siguiente modelo.

Figura 126. Sessiondesk Gustav Workstation. *(Studio desk)*

La serie básica cuenta con dos racks superiores de 9 unidades, estantes integrados para altavoces de campo cercano y gestión de cables, dimensiones de 235 x 113 x 92 cm (ancho x alto x profundidad) y peso aproximado de 48 kg.

8.5 Instalación de audio.

8.5.1 Niveles de señal.

Los equipos de audio manejan diferentes niveles de señal, dependiendo de sus características. Los niveles de señal más comunes usados por los equipos de un estudio de grabación son:

Nivel de señal	***Valores***	***Uso***
Bajo nivel	-80 dBu - -20 dBu 77 µV - 77mV	Micrófonos
Alto nivel de línea	-20 dBu - +30 dbu 77 mV - 24,5 V	Enrada/Salida en resto de equipos

Tabla 39. Nivel de señales.

La mayoría de equipos trabajan internamente con señales a nivel de línea. Existen dos tipos de equipos con señales de nivel de línea diferentes, los equipos de consumo y los equipos profesionales.

8.5.2 Tipos de señal

Existen dos tipos de señales de audio: señales balanceadas y no balanceadas.

Por un cable **balanceado** viaja la misma señal dos veces, pero en una de ellas cambiada de polaridad, con salida la diferencia de potencial entre los puntos. El fin de de la señal balanceada es evitar ruidos e interferencias que distorsionen la señal original.

A esta transmisión se le añaden ruidos, es decir, variaciones en el voltaje original.

$$V = V2 - V1 = (V1 + VR) - (-V1 + VR) = 2V1$$

Tenemos la misma señal dos veces sin interferencias, ya que se anulan al ser sumadas con polaridades contrarias.

Los cables balanceados transportan tres señales (dos de ida y su retorno), por lo que para realizar las conexiones son necesarios tres puntos de conexión (2 mini cables y malla). Las señales balanceadas se reducen a cables con conectores XLR y TRS en ambos extremos.

En la señal **no balanceada** un cable lleva la señal y otro el retorno, hecho por malla sin protección para ruidos. Son transportadas por cables con conectores RCA y TS.

8.5.3 Cableado y conectores

Los cables pueden ser clasificados en función del tipo de señal que transporten. A continuación, se muestra un esquema de la composición interna de los dos tipos de cableado.

Figura 126. Composición interna de los cables a utilizar. [26]

La malla es el cable que normalmente va rodeando el resto de cables. Se hace para crear un campo alrededor intentando protegerlo de interferencias externas. Para transporten señales balanceadas será necesario un cable compuesto de 2 mini cables albergados en su interior, o lo que es lo mismo, 1 mini cable y malla. Para señales no balanceadas necesitaremos un cable que albergue 2 mini cables y malla.

A continuación, se detallan los tipos de conectores que se utilizarán en la instalación de audio clasificados según el tipo de señal analógica o digital.

Señal Analógica

XLR. También conocido como CANON, es la conexión estrella entre los micrófonos y las mesas de mezcla. Tiene 3 pines que suelen identificarse mediante enumerado al lado de cada patilla, (1 malla, 2 vivo y 3 frío).

Figura 127. Conector XLR. [26]

TRS. También conocido como Jack, tiene 3 puntos de conexión: punta, anillo y malla.

TS. El TS es igual que el TRS pero carece de anillo, lo cual lo convierte en un conector con 2 puntos de conexión: punta y malla. El diámetro en ambos casos es ¼ de pulgada (6,35 mm).

Figura 128. Conector TS y TRS. [26]

Señal Digital

RCA. O cinch es el más común de los conectores de audio que nos podemos encontrar en sistemas domésticos, mini cadenas, reproductores de CD. Tiene dos puntos de conexión, punta y cuerpo.

Figura 129. Conector RCA. [26]

ADAT. El protocolo ADAT utiliza fibra óptica para su transmisión. Se trata de un hilo muy fino transparente, de vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. Los conectores que utilizan son Toslink.

Figura 130. Conector Toslink. [27]

FireWire. Estándar de transmisión de datos digitales a alta velocidad FireWire (hasta 400 Mbps), con conectores 1394b Beta de 9 pines.

Figura 131. Cable FireWire 800, conector macho. [27]

El cable es fino y flexible, de seis hilos, 4 para la transferencia de datos y dos para la alimentación de corriente.

MIDI.

Figura 132. Conector DIN-5 MIDI macho de 5 pines. [27]

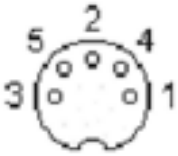


Figura 133. Pines del conector DIN-5 MIDI. [27]

Los pines 1 y 3 quedan libres de conexión. Los pines 2, 4 y 5 se encuentran conectados de la siguiente manera:

- Pin 2: pantalla (GND).
- Pin 4: Fuente de corriente (+5 V).

- Pin 5: Datos

USB.

Figura 134. Conector USB, tipo A (izquierda) y tipo B (derecha) de 4 pines. [27]

WordClock. Conector BNC que utiliza un cable coaxial y pose una impedancia de 75 Ω.

Figura 135. Conector BNC.

HDMI. Interfaz multimedia de alta definición, es el tipo de conexión usada para conectar el monitor TFT y la PC.

Figura 136. Conector HDMI

8.5.4 Interconexión

Cada conexión entre dos equipos, posee un tipo de color diferente, para diferenciar el tipo de señal y cable con el que tratan. A continuación, se expone una leyenda de dichos colores:

Figura 137. Leyenda del tipo de señales

Las interconexiones con cada equipo se van a especificar mediante dos tablas. La primera para las conexiones de entrada y la segunda para las conexiones de salida. Los equipos que disponen de entradas o salidas se han especificado en una tabla. En el caso de los patch pannel las tablas varían.

- **PATCH PANNEL**

El estudio dispone de tres patch pannel, uno en la sala de grabación (Sala A), concretamente en la wall box, y dos en la sala de control (Patch Pannel A y B). La hilera de conectores superior OUT corresponden a las salidas del patch. La hilera de conectores inferior se denominan IN, y corresponde con las entradas del patch.

Patch Pannel en Sala A. Wall box

ORIGEN	CABLE	ENTRADA	SALIDA	CABLE	DESTINO
1-8/Patch IN	XLR	1-8/CH IN Mixer	1-8/PrevioMic	XLR	1-8/Patch OUT
9-12/Patch IN	XLR	9-12/CH IN Mixer	9-12/PrevioMic	XLR	9-12/Patch OUT
13-14/Patch IN	XLR	13-15/CH IN Mixer	13-14/PreviMic	XLR	13-14/Patch OUT
15-16/Patch IN	XLR	15-16/CH IN Libre	15-16/PrevLibre	XLR	15-16/Patch OUT

Tabla 40. Conexionado de patch pannel en Sala A.

Patch Pannel en Sala Control 1

Las únicas conexiones normalizadas son las e micrófonos, con lo que no hace falta latiguillos Bantam. Los demás tipos de señales son de línea y quedan libres de normalización.

Las 16 primeras conexiones normalizadas corresponden a las entradas de micrófono de los preamplificadores o previos.

Las 6 señales siguientes. Son los envíos de las señales de línea a los previos.

ORIGEN	CABLE	ENTRADA	NORMALIZACION	SALIDA	CABLE	DESTINO
M1-M8 Previo1Micro	XLR/Mic	1-8 PatchIN	Full-Normalled	1-8 PatchOUT	XLR/Mic	1-8 Micro
M1-M4 Previo1Micro	XLR/Mic	9-12 PatchIN	Full-Normalled	9-12 PatchOUT	XLR/Mic	1-4 Micro
M1-M2 PrevioMicro	XLR/Mic	13-14 PatchIN	Full-Normalled	13-14 PatchOUT	XLR/Mic	1-2 Micro
M1-M2 Previo3Libre	XLR/Mic	15-16 PatchIN	Isolated	15-16 PatchOUT	-----	Desconectado
Desconectado	-----	17-22 PatchIN	Isolated	17-22 PatchOUT	TRS/Lin	Lin5-Lin8 Previo2Linea
Lin1-Lin10 AmpAuricularL	TRS/Linea	23-32 PatchIN	Isolated	PatchOUT	-----	Desconectado
Desconectado	-----	PatchIN	Isolated	33-48 PatchOUT	TRS/Lin	Lin1-Lin8 828 MKII

Tabla 41. Conexionado del patch pannel 1.

Patch Pannel en Sala Control 2

Dedicado a la monitorización. Transporta las señales de la DAW. Recoge las señales de línea de las interfaces desde el conector 1 Patch OUT hasta 16 Patch OUT. En la parte de la derecha, se encuentran todas las entradas y todas las salidas de monitorización de la Machine, Mezcladora y monitores de campo cercano.

En este caso las entradas y las salidas cambian. Ahora las entradas están en las columnas de las salidas, y viceversa

ORIGEN	CABLE	ENTRADA	SALIDA	CABLE	DESTINO
Lout1-Lout16 Inte Aud 828 MKII	TRS/Lin	1-16 Patch OUT	Patch IN	----	Desconectado
L - R MAIN OUT / Mixer	TR/FBOutLR	31-32 Patch OUT	Patch IN	----	Desconectado
Ampl Aur OUT LR	TR/Lin	33-34 Patch OUT	Patch IN	TR/Lin	MAIN IN LR /Mixer
Monitor A L R	TRS	35-36 Patch OUT	35-36 Patch IN	XLR	L – R
Monitor B LR	TRS	36-37 Patch OUT	36-37 Patch IN	----	Desconectado
Out L – R 2-trackA	TRS	38-39 Patch OUT	38-39 Patch IN	TRS	L – R 2-trackA
Out L – R 2-trackB	TRS	40-41 Patch OUT	40-41 Patch IN	TRS	L – R 2-trackA
Out L - R DAW	TRS	42-43 Patch OUT	42-43 Patch IN	TRS	DAW Mix L - R
Out L - R Studio	TRS	44-45 Patch OUT	44-45 Patch IN	TRS	Auricular Mix IN L - R

Tabla 42. Conexionado Patch Pannel 2 en sala de control.

- PREAMPLIFICADOR DE MICRÓFONO

El preamplificador *Previo1* únicamente tiene conectadas las entradas analógicas de micrófono (XLR). Las señales se envían vía ADAT a la interfaz de audio *828 MKII.* Se utilizan dos vías ópticas. Los canales de salida digital AES/EBU quedan desconectados.

El *Previo2* posee 4 entradas de micrófono, que provienen de la normalización del patch 2 IN desde 9-12. Las otras 4 entradas, pertenecen a las entradas de línea de los anales 5 a 8. Las señales de línea entrantes en los 4 primeros canales quedan desconectadas. Las 4 salidas digitales AES/EBU también quedan desconectadas. Como el Previo1, se tienen dos salidas ADAT vía óptica, actuando de la misma manera que anteriormente.

Finalmente, el *Previo3* posee dos entradas de micrófono y dos de línea, proveniente de las salidas de patch 13-14 OUT normalizadas y patch 21-22 no normalizadas. Las salidas analógicas de línea quedan desconectadas. La transmisión digital de las señales se realiza vía SPDIF al Interfaz de Audio 828-1 al no quedar libre ninguna entrada óptica en las interfaces.

ORIGEN	**CABLE**	**IN / ENTRADA**
1-8 / Patch 1 OUT	**XLR**	**1-8 / Previo1 Mic**
Patch1 OUT / W.C OUT 1	WordClock	Previo1 WC IN
Desconectado	Desconectado	Previo1 AES/EBU IN Sync 1
1-8 / Previo1 OUT	Desconectado	Desconectado
Previo1 ADAT Main	ADAT/Main/4canales	InterfazAudio IN ADAT A
Previo1 ADAT Aux	ADAT/TOSlinkAux/4canales	InterfazAudio IN ADAT B

Previo1 AES/EBU OUT / 1-2	Desconectado	Desconectado
Previo1 OUT 1-8	Desconectado	Desconectado
9-12 / Patch 1 OUT	**XLR**	**1-4 / Previo2 Mic**
13-16 / Desconectado	Desconectado	1-4 / Previo2 Linea
17-20 / Patch 1 OUT	**XLR**	**5-8 / Previo2 Linea**
21-24 / Desconectado	Desconectado	1-4 / Previo2 Retorno
ABB WC OUT 2	Reloj / WC	Previo2 WC IN
Desconectado	Desconectado	1-2 / Hi-z frontal
13-14 / Patch1 IN	**Soldado-XLR / Previo3 M1-2**	**Previo3 Mic 1-2**
21-22 / Patch1 IN	**Soldado-TRS / Previo3 L1-2**	**Previo3 Linea 1-2**
SPDIF OUT	SPDIF/sinc3/4	Previo3 SPDIF IN

Tabla 43. Conexionado de entrada preamplificadores de micrófono.

OUT / SALIDA	CABLE	DESTINO
1-8 / Previo1 OUT	Desconectado	Desconectado
Previo1 / ADAT Main	ADAT / Main	InterfAudio 828/ADAT B IN
Previo1 / ADAT Aux	TOSlink- ADAT/Aux	InterfAudio 828/ADAT B IN
1-2 / Previo1 AES/EBU OUT	Desconectado	Desconectado
1-8 / Previo1 OUT	Desconectado	Desconectado
3-4 / Previo1 AES/EBU OUT	Desconectado	Desconectado
Desconectado	Desconectado	3-4 / Hi-z frontal
1-4 / Previo2 Linea OUT	Desconectado	Desconectado
1-4 / Previo2 Send	Desconectado	Desconectado
1-8 / Previo2 ADAT	ADAT / Previo2ADAT-8	InterfazAudio ADAT B IN

Previo2 ADAT smux	ADAT/Previo2ADATsmux	InterfazAudio ADAT A IN
1-4 / Previo2 AES/EBU OUT	Desconectado	Desconectado
Previo2 WC OUT	Desconectado	Desconectado
Previo3 LíneaOUT XLR/TRS 1	Desconectado	Desconectado
Previo3 LíneaOUT XLR/TRS 2	Desconectado	Desconectado
Previo3 SPDIF OUT	SPDIF/ Previo3spdifOut	InterfAudio 828 SPDIF IN
Previo 3 óptico	Desconectado	Desconectado

Tabla 44. Conexionado de salida preamplificadores de micrófono.

- Interfaz de Audio 828 MKII Hybrid

El interfaz 828 MKII recoge las señales digitales de los previos2 vía. Por otro lado, se encuentran conectadas las señales de entrada de línea al patch 1 (1-33 IN / 1-40 IN), y las señales de salida de línea al patch 2 (1-9 IN / 1-16 IN) para poder realizar la monitorización. La transferencia de datos al ordenador, se puede realizar mediante FireWire o USB. Se ha optado por la transferencia de datos FireWire.

ORIGEN	**CABLE**	**IN / ENTRADA**
33-40 / Patch 1 IN	**Sold-TRS/828L1-8**	**1-4 / 828 Linea**
Desconectado	Desconectado	1-2 Frontal/828 Mic/Linea IN
Desconectado	Desconectado	Frontal 828 (Main)
Desconectado	Desconectado	Frontal 828 (Auriculares)
Previo2 ADAT / 1-8	ADAT/Previo2 1-8	828-ADAT B IN
ABB SPDIF OUT	SPDIF/sinc3	Previo2 SPDIF IN

ABB WC OUT 4	WordClock/WC	828 WC IN
Desconectado	Desconectado	828 Time SMPTE IN
Desconectado	Desconectado	828 MIDI IN

Tabla 45. Conexionado de entrada de la Interfaz de Audio

OUT / SALIDA	**CABLE**	**DESTINO**
1-8 / 828 L OUT	**TRS-sol / 828 L OUT 1-8**	**9-16 / Patch1 OUT**
828 Main OUT L-R	Desconectado	Desconectado
828 Send 1-2	Desconectado	Desconectado
828 Time SPMTE	Desconectado	Desconectado
828 Foot Switch	Desconectado	Desconectado
828 óptico OUT A-B	Desconectado	Desconectado
828 MIDI OUT	Desconectado	Desconectado
828 SPDIF OUT	Desconectado	Desconectado
828 WC OUT	Desconectado	Desconectado

Tabla 46. Conexionado de salida de la Interfaz de Audio

I/O	**CABLE**	**INTERCONEXIÓN**
828 FireWire OUT	1394b Beta-1304b Beta Beta/FireWire/FireWire2	PC / FireWire2
828 FireWire B	Desconocido	Desconocido
USB	Desconocido	Desconocido

Tabla 47. Conexionada transferencia de datos IA 828 MKII Hybrid

- CONTROL DE MONITORES

El control de monitores suele tener todas las entradas y salidas conectadas. En el caso de las salidas para amplificador de auriculares y monitor se encuentran normalizadas en el patch pannel 2.

Se procede a cortar el apantallamiento de los cables soldándolo a la salida del equipo, respetando la regla de un solo final.

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
43- 44 / PatchPannel 1 OUT	Sol-TRS / 2track L-R	BB – 2track L - R
45 - 46 / PatchPannel 1 OUT	Sol-TRS / DMix L-R	BB DAW Mix L - R
47- 48 / PatchPannel 1 OUT	Sol-TRS / PhoneMix L-R	BB Phone Mix Input L - R

Tabla 48. Conexionado de entrada control de monitores

OUT / SALIDA	CABLE	DESTINO
Mixer / Main OUT L - R	TRS – sol / FB Out L-R	35-36 / Patch1 IN
BB Phones amp OUT L – R	TRS–sol/phonesAmpOut L-R	37-38 / Patch1 IN
BB Monitor (MAIN) L – R	TRS–sol/ Monitor(MAIN) L-R	39-40 / Patch1 IN
BB Monitor (P.A) L - R	TRS – sol / Monitor(P.A) L-R	41-42 / Patch1 IN
BB 2-track(MAIN) OUT L – R	TRS–sol/2-trackMainOut R-L	43-44 / Patch1 IN
BB DAW OUT L - R	TRS – sol / DMixOut L-R	45-46 / Patch1 IN
BB Studio OUT L - R	TRS – sol / StudioOut L-R	47-48 / Patch1 IN

Tabla 49. Conexionado de salida control de monitores

- MESA DE MEZCLAS. MIXER ZEDR16

Las entradas se encuentran normalizadas en el patch. Su origen principal viene desde la salida *BB Phones amp OUT* en el control de monitores.

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
33-34 / Patch1 OUT	Sol-TRS / FoldBack L-R	AMM Main IN L-R
Desconectado	Desconectado	Mixer / Insert IN Frontal
Desconectado	Desconectado	Mixer / Headphone CH 1-6 Frontal

Tabla 50. Conexionad de entrada Mixer.

OUT / SALIDA	CABLE	DESTINO
AMix 1.1 – 1.2	TRS-TRS / Tipo A / FB1.1-1.2	27-28 - Foldback 1.1-1.2
AMix 2.1 – 2.2	TRS-TRS / Tipo A / FB2.1-2.2	27-28 - Foldback 2.1-2.2
AMix 3.1 – 3.2	TRS-TRS / Tipo A / FB3.1-3.2	27-28 - Foldback 3.1-3.2
AMix 4.1 – 4.2	TRS-TRS / Tipo A / FB4.1-4.2	27-28 - Foldback 4.1-4.2
AMix 3.1 – 3.2	TRS-TRS / Tipo A / FB5.1-5.2	27-28 - Foldback 5.1-5.2
AMix 3.1 – 3.2	TRS-TRS / Tipo A / FB3.1-3.2	27-28 - Foldback 6.1-6.2
Mixer / Main OUT L – R	TRS-sol / Tipo B / FBOut L-R	31-32 / Patch1 IN

Tabla 51. Conexionad de salida Mixer.

- MONITORES DE CAMPO CERCANO L-R

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
35 / Patch1 OUT	Sol-XLR/B/ M(MAIN L)	Monitor MAIN L
36 / Patch1 OUT	Sol-XLR/B/ M(MAIN R)	Monitor MAIN R

Tabla 52. Conexionado monitor campo cercano (main L-R).

- MONITOR DEL SISTEMA DE PA L - R

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
38 / Patch1 OUT	Sol-XLR/B/ M(PA L)	Monitor PA L
39 / Patch1 OUT	Sol-XLR/B/ M(PA R)	Monitor PA R

Tabla 53. Conexionado monitor SISTEMA PA (L - R).

- SUPERFICIE DE CONTROL. MACHINE

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
Interfaz MIDI Out 4	DIN-5-DIN-5 / Midi / MDI4	MACHINE Midi IN
Desconectado	Desconectado	3-4 / MACHINE Midi IN
Desconectado	Desconectado	MACHINE Midi External Control

Tabla 54. Conexionado de entrada Machine.

OUT / SALIDA	CABLE	DESTINO
MACHINE Midi OUT	DIN-5-DIN-5 / Midi / MDO4	Midi IN 4
3-4 / MACHINE Midi OUT	Desconectado	Desconectado
1-2 / MACHINE Midi User Witch	Desconectado	Desconectado

Tabla 55. Conexionado de salida Machine.

I/O	CABLE	INTERCONEXIÓN
Machine USB	Desconectado	Desconectado

Tabla 55. Conexionado de transmisión de datos digitales Machine.

- TECLADO CONTROLADOR MIDI

Los teclados de controlador MIDI tienen la posibilidad de conexón con la DAW mediante USB o a partir de la interfaz MIDI. En este caso se ha conectado a la interfaz MIDI.

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
MIDI OUT 3	DIN-5-DIN-5 / Midi / MDO3	Teclado KONTROL / MIDI IN

Tabla 56. Conexionado de entrada a Teclado controlador MIDI

OUT / SALIDA	CABLE	DESTINO
Machine MIDI OUT	DIN-5-DIN-5 / Midi / MDO4	Midi IN 4

Tabla 57. Conexionado de salida controlador MIDI

I/O	CABLE	INTERCONEXIÓN
Teclado Kontrol / USB	Desconectado	Desconectado

Tabla 58. Conexionado de transmisión de datos digitales Teclado Kontrol.

- TORRE PC

Al ordenador quedan conectadas las interfaces Midi vía usb y dos puertos FireWire.

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
Desconectado	Desconectado	PC ótico IN
Desconectado	Desconectado	PC TS/minijack IN

Tabla 59. Conexionado de entradas PC.

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
1-2 / PC OUT	HDMI-HDMI/HDMI/OUT1-2	TFTControl / TFTSalaA
PC auriculares	Desconectado	Desconectado
PC altavoces	Desconectado	Desconectado
PC óptico Out	Desconectado	Desconectado
PC minijack TS	Desconectado	Desconectado

Tabla 60. Conexionado de salidas PC.

I/O	CABLE	INTERCONEXIÓN
PC FireWire	1394b Beta-1304b Beta Beta/FireWire/FireWire	828 Firewire OUT / InterfazAudio 828
PC USB 1	USBtipoA – USBtipoB / USB KontrolMidi	MIMI KONTROL USB / Interfaz MIDI
PC USB 2-3	Desconectado	Desconectado
PC USB 4-5 Frontal	Desconectado	Desconectado
PC WireFire 1-2	Desconectado	Desconectado

Tabla 61. Conexionado de transmisión de datos PC.

- MONITORES TFT

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
PC OUT1	HDMI-HDMI/HDMI/OUT1	TFTControl/ HDMI IN

Tabla 62. Conexionado de entrada monitor TFT control.

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
PC OUT2	HDMI-HDMI/HDMI/OUT2	TFTSalaA / HDMI IN

Tabla 63. Conexionado de entrada Monitor TFT sala A.

- GENERADOR DE RELOJ

Finalmente, se envía la señal de sincronización via Word Clock al previo1, previo2 de micrófonos y a la interfaz de audio, y vía SPDIF al Previo3 bicanal.

ORIGEN	CABLE	IN / ENTRADA
Desconectado	Desconectado	ABB AES / EBU IN 1-2
Desconectado	Desconectado	ABB SPDIF IN
Desconectado	Desconectado	ABB Optical IN
Desconectado	Desconectado	ABB WC IN

Tabla 64. Conexionado de entradas generados de reloj

OUT / SALIDA	CABLE	DESTINO
ABB WC OUT 1-4	WordClock / wc1	Previo1 WC IN
ABB SPDIF OUT	SPDIF / sinc3	Previo3 SPDIF IN
ABB AES / EBU OUT 1-2	Desconectado	Desconectado
ABB Optical OUT	Desconectado	Desconectado
ABB WC OUT 5-6	Desconectado	Desconectado

Tabla 65. Conexionado de salidas generador de reloj.

8.6 PLANOS

8.6.1 Patches Pannel

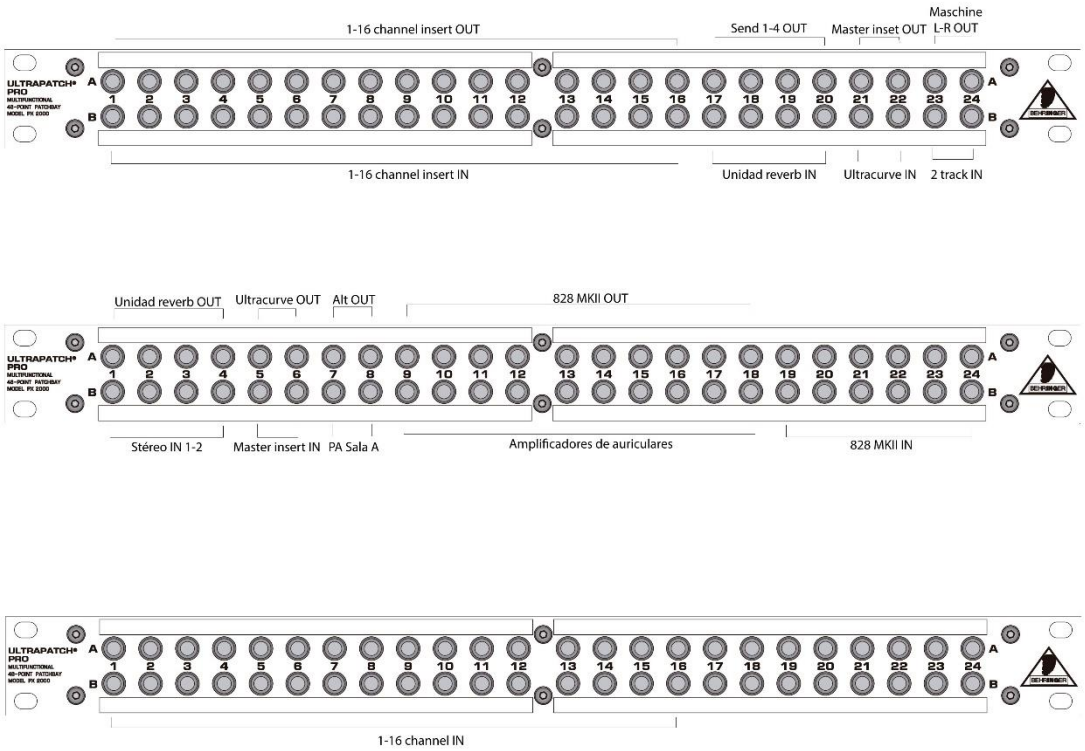


Figura 138. Diagrama de conexionado Patch Pannel.

8.6.2 Esquema del conexionado de equipos

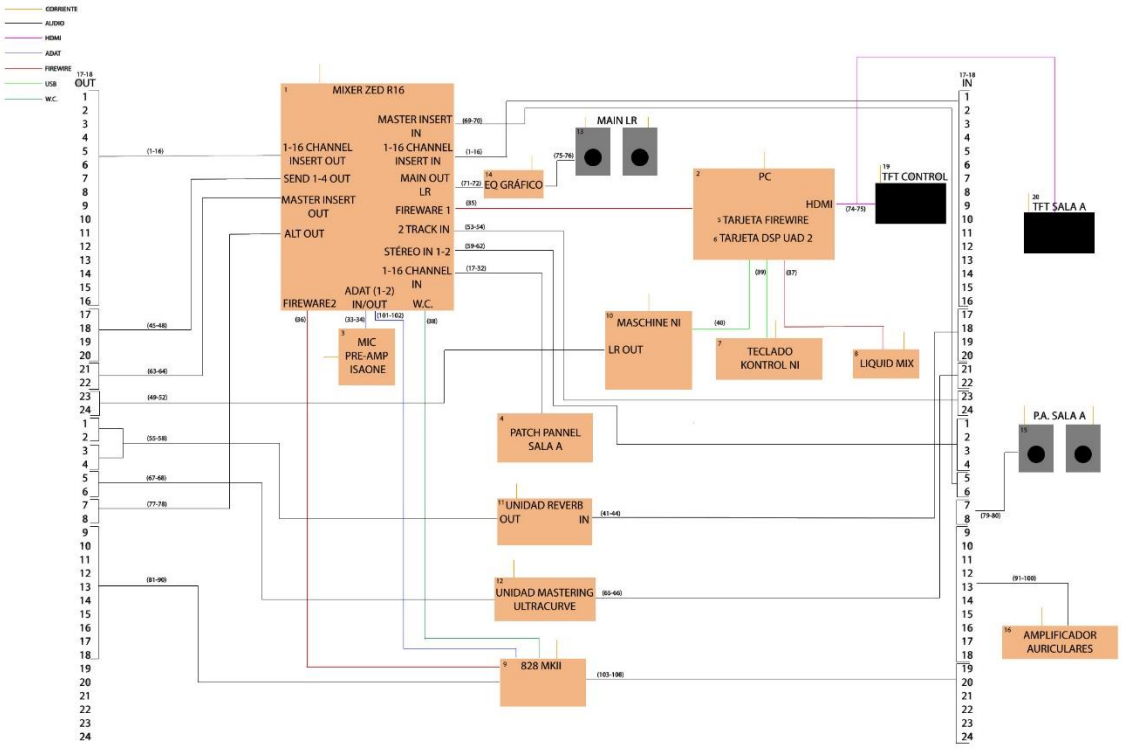


Figura 139. Plano Esquema conexionado del estudio de grabación.

9. CONCLUSIONES GENERALES

En este capítulo se pretende reflejar de forma resumida los aspectos más importantes que se han extraído del desarrollo de este trabajo. Con el fin de esquematizar todos los datos adquiridos y obtener una valoración general del estudio de grabación musical de la Escuela Politécnica de Cáceres.

En primer lugar, reflejaré información sobre el procedimiento llevado a cabo para el desarrollo y finalización de este trabajo, así como las horas necesitadas para ello. A continuación, se muestra en un esquema la metodología de trabajo realizado.

- Conocimientos previos sobre diseños de estudios de grabación musical. Este primer proceso fue llevado a cabo mediante la lectura de un libro manual de este tipo de recintos proporcionados por el tutor, el cual me sirvió para profundizar en el diseño de este tipo de salas y la complejidad que conlleva su estudio acústico. Para la lectura, comprensión y resumen del libro de *F. Alton Everest & Ken.C Pohlmann [7]*, se empleó aproximadamente 100 horas durante dos meses.
- Seguidamente procedí a la a la realización de las medidas para estudiar el comportamiento acústico del recinto. Para ello, en primer lugar, repaso de normativas ISO y elección tanto de los parámetros a calcular como de la elección de los puntos de medida y equipamiento. Este proceso al completo llevó aproximadamente un tiempo de 50 horas durante un mes y medio.
- Una vez extraído los datos adquiridos en las mediciones calculé los parámetros acústicos para la valoración del aislamiento y el criterio de salas. El proceso de estos cálculos llevó menos de un mes con un máximo de 30 horas.

- Con los parámetros acústicos extraídos en el criterio de salas, como el tiempo de reverberación, definición, claridad musical y más, surgió la necesidad de realizar una propuesta de mejora acústica. El tutor me propuso realizar un diseño virtual del estudio de grabación mediante el software Catt Acoustic y poder realizar una propuesta de acondicionamiento. El diseño de simulación llevado a cabo, junto con la propuesta de mejora acústica añadiendo materiales acústicos ha sido el proceso más laborioso de este trabajo, pero el más satisfactorio. En definitiva, este capítulo abarcó la parte de validación de los datos obtenidos en simulación con los medidos reales y el posterior cálculo de parámetros con la propuesta de acondicionamiento, llevado a cabo en un tiempo de 100 horas durante algo más de dos meses.
- Posteriormente, se procedió a desarrollar por escrito el método experimental que iba a formar el trabajo, con un total de 40 horas durante dos semanas.
- En el proceso de corrección de errores por parte de los tutores, surge la idea de añadir a la parte teórica los equipos de sonido que se instalarán en el estudio de grabación. El total de tiempo necesitado para la corrección de errores, sonorización del estudio y completar la memoria fue de aproximadamente 120 horas en dos meses.

Por lo tanto, el proceso llevado a cabo para la realización de este trabajo ha sido con un tiempo aproximada de 440 horas.

Conociendo el proceso llevado a cabo para este trabajo, se plantea en modo de resumen una valoración general de los datos calculados durante la realización del mismo.

Se puede empezar a comentar sobre el comportamiento del aislamiento acústico, ya que fueron las primeras medidas que se realizaron. Para calcular los parámetros de aislamiento es necesario, en primer lugar, calcular el ruido de fondo y el tiempo de reverberación de la sala a estudiar. Observando las recomendaciones del RF y TR para salas de grabación, me di cuenta rápidamente que no cumplían las exigencias recomendadas a ciertas frecuencias, ya que recomiendan un criterio de ruido de fondo NC15 y en nuestro caso se obtuvieron valores de NC20 y NC30 en la sala de control y grabación respectivamente.

Para el tiempo de reverberación, se obtuvieron valores del TR_{mid} de 1,29 para ambas salas. Se recomiendan valores de 0,2 a 0,4 segundos, pero con la ventaja de que estos valores son validados en comparaciones con salas ocupadas. Al medir el aislamiento acústico las normativas recomiendan medir en salas vacías, por lo que se puede deducir que con la existencia de mobiliario y audiencia en la sala este valor de tiempo de reverberación disminuirá, sobre todo, en la banda de frecuencias medias y altas.

Una vez obtenidos los datos, se pudo proceder al cálculo del aislamiento acústico, el cual se realizó para aislamiento a ruido aéreo ente recinto interiores y con respecto al ruido exterior o de fachadas. También se realizaron medidas para el ruido de impacto o vibraciones del suelo flotante construido sobre el anterior suelo de baldosas. Finalmente, para analizar el comportamiento acústico de las salas se procedió al cálculo de los criterios de inteligibilidad y musical.

En primer lugar, los resultados obtenidos de los índices de reducción sonora en aislamiento a ruido aéreo, sirven para llegar a la conclusión que son muy ajustados y no cumplen o muy justos las normativas del CTE para la protección frente al ruido. Al menos se tiene la tranquilidad de que con respecto al ruido exterior o de fachada y a impactos sí que se cumple lo exigido por las normativas.

Por lo tanto, sabiendo que el ruido no deseado que se generará va a dar lugar a salas del mismo uso en el garaje, una propuesta de mejora de aislamiento acústico añadiendo mayor número de capas del sistema de yeso laminado al estudio sería no sería rentable con la problemática que daría lugar una diminución de las dimensiones en la acústica por la creación de modos de salas.

Para la realización de una mejora acústica virtual, primero es necesario verificar que los valores obtenidos mediante las medidas in situ se asemejan a las adquiridas en la simulación antes de la mejora. Si no es así, se procede a la variación de los coeficientes de absorción de los materiales añadidos en el Catt acoustic así, estimar por ejemplo con el Tiempo de reverberación, que las dos medidas tienen los mimos valores. En el caso de este trabajo, se tuvo que disminuir el coeficiente de absorción por lo consiguiente a que los resultados del TR en la simulación del recinto era menos que en las medias reales. Este motivo es principalmente debido que, en el periodo de medidas reales, no se habían rematado bien el sellado de las puertas, por lo que el sonido emitido por la fuente salía al exterior y creaba un campo reverberante en los recintos colindantes a la sala en estudio que posteriormente volvía a introducirse en la sala, captando valores más elevados que los simulados ya que en esta situación la fuga de sonido es nula.

Una vez validadas las medidas de las simulaciones, se procede al diseño de acondicionamiento acústico de las salas de grabación y control. Se prestó mayo atención en la sala de control, ya que es la sala con más necesidad de mejora acústica ya que será donde se necesite mayor agudeza del oído. Además, hay bastante información sobre filosofías de diseño para llevar a cabo. En este trabajo, se procedió a la mejora acústica basándome en tipos de salas LEDE, ya que en la fase de construcción fue diseñada con este fin, diseñando el suelo y las paredes con una inclinación y evitar las reflexiones tardías en el oyente. Por lo tanto, se procedió al diseño de paneles absorbentes me absorción media, trampa de graves para

atacar las frecuencias graves y un difusor en cual reflejara uniformemente por la sala todo el sonido recogido en la parte de atrás. Para la sala de grabación se escogieron paneles absorbentes de menor tamaño para poder moverlos por la sala a elección de la posición de los músicos.

En definitiva, una vez diseñada la mejora se procedió a la comparación con los valores de la sala sin acondicionar, dando uno resultados más que gratificantes. Con un tiempo de reverberación casi lineal en frecuencias. Alrededor de 0,6 segundos para frecuencias graves y 0,4 segundos para las demás bandas de frecuencias, teniendo en cuenta que son medidas de sala en vacío. Lo cual nos hace pensar en realizar futuros trabajos midiendo el comportamiento acústico de la sala ocupada, por ejemplo, cuando instalen los equipos de sonido. Otros parámetros acústicos, como la claridad musical, la cual se define como el grado de separación de composiciones de música dan lugar a valores en el rango de lo recomendado para salas dedicadas a la música amplificada gracias a la mejora acústica. Como ya se sabe, no solo afectará esta mejora en la escucha de sonido de instrumentos, sino que también en la sala de grabación adquiriendo un buen grado de inteligibilidad en el habla o definición, claridad de voz. se conseguirá que el vocalista produzca una alta calidad en las grabaciones.

Por último, se decidió realizar la instalación de audio del estudio de sonido mediante tablas y diagramas de conexionado, adquiriendo también conocimientos en la rama de audio digital y analógico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] López, Daniel. *Ingeniería del sonido*. Sistemas de sonido en directo. Starbok,2009

[2] Chacón, Paloma. *Estudio acústico y diseño del Teatro Price de Madrid*. UPM. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, 2008.

[3] Ortiz, Luis I. Refuerzo Sonoro. Base para el diseño. Departamento de Ingeniería audiovisual y comunicaciones. UPM, 1992.

[4] Carrión, Antonio. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. UPC, 1998.

[5] Leach, W. Marsahll. Introduction to electroacoustics and audio amplifier design (2nd Edition). Kendal/Hunt, 1999**.**

[6] Abad Sorbet, Marta. Estudio Acústico y Electroacústico de la sala de conciertos Ritmo y Compás (Madrid)**.**

[7] F. Alton Everest & Ken.C Pohlmann. HandBook of Sound Studio Construction, Rooms for Reconrding and Listening. 2003.

[8] Vázquez Rosado, Manuel. “Metodología de diseño de estudios de grabación y aplicación a caso práctico”, UPM. 2010

[9] Tema 6 - Materiales Acústicos para Acondicionamiento Acútico. Asignatura de Aislamiento y Acondicionamiento acústico. GISIT.UEX

[10] (05/01/2019) https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/io6/public_html/Paginas/difu.html

[11] Díaz Sanchidrián, Cesar. "Cuadernos de acústica en la edificación, Aislamiento acústico I", UPM.

[12] (7/01/2019), Catálogo de reverberación, www.reverb-out.com

[13] *Normativa UNE-EN_ISO_3382-2:2008." Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios".*

[14]. *Normativa UNE-EN_ISO_16283-1:2015." Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo".*

[15] Normativa UNE-EN_ISO_717-1: Evaluación del aislamiento a ruido aéreo.

[16] Normativa UNE-EN_ISO_16283-2: Aislamiento a Ruido de Impactos.

[17] *Normativa UNE-EN_ISO_16283-2:2016. "Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos".*

[18] *Normativa UNE-EN_ISO_16283-3:2016. "Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en elementos de construcción. Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada".*

[19] (10/01/2019) *SketchUp* de Google. https://app.sketchup.com/app?hl=es

[20] amroc. The Room Mode Calculator. https://amcoustics.com/tools/amroc (26/01/2019)

[21] Documento Básico de protección frente al ruido del CTE, DB-HR.

[22] CATT-A v9.1 User´s Manual CATT-Acoustic™ v9.1.

[23] Beranek, L. L. (1996)

[24] Marshall, L. G. (1994)

[25] Absorción de materiales. (4/02/2019) http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/Tablas-de-Absorcion.pdf

[26] Conexionado https://www.hispasonic.com/tutoriales/conexionado-soldadura/1948 05/02/219

[27] Herreros Carballo, Sergio. *"Diseño del equipamiento de un estudio de grabación digital".* EUIT, 2013.

ANEXO A: SISTEMA DE MEDIDAS dBBATTI32

dBBATI32 es un paquete de software empleado para la realización de medidas acústicas en el interior de edificios. Fue desarrollado por el equipo *01 dB-Stell*, perteneciente a *MVI technologies group*.

Consta de múltiples módulos que determinan su funcionalidad. Se utiliza conjuntamente con la unidad de adquisición *Symphonie* (dos canales), conectada a un ordenador mediante tarjeta PCMCIA.

La unidad *Symphonie* se encarga de la adquisición de las medidas acústicas en la sala y de su transferencia al ordenador para su almacenamiento y procesamiento. También desarrolladas por la empresa *01 dB* cumplen los estándares *IEC 60651* e *IEC 60804*.

El programa dbBATI32 y la unidad Symphonie aportan a nuestro ordenador una gran versatilidad, convirtiéndolo en un grabador de audio digital, un medidor de niveles sonoros, un analizador de frecuencia y un sistema optimizado para medidas acústicas en edificios. El conjunto constituye, por lo tanto, un sistema de medida de elementos hardware, ordenador portátil y aplicaciones software.

El dbBATI32 tiene una interfaz gráfica con disposición de tres gestores que permiten configurar las medidas y manipular la información resultante de forma sencilla y rápida.

Las extensiones de cada uno de ellos *.GSM, para el gestor de medida, *.GSA, para el gestor de análisis y *.GSC, para cálculos estandarizados. Todos los datos procedentes de los tres gestores son almacenados conjuntamente en único fichero de sesión de medidas de extensión *.CMG.

Entre los parámetros más destacables encontramos el tipo de señal emitida, en nuestro caso una señal estacionaria interrumpida para el cálculo de aislamiento acústico y señal impulsiva para tiempos de reverberación. Esta señal es creada por el generador de ruido rosa integrado en el sistema de medida. Necesita conectar un amplificador a la unidad de adquisición de Symphonie.

El gestor de medida es el responsable de la adquisición de las medidas de la sala. Mide la respuesta en frecuencia, en octavas o tercios de octava de distintos tipos de ruido para realizar cálculos de aislamiento estandarizados como el ruido de fondo, ruido emitido, ruido aéreo recibido, ruido de impacto recibido. Representa la medida del espectro del tiempo de reverberación, que sirve de base en cálculos de aislamiento y absorción estandarizados.

El gestor de análisis se encarga de realizar el análisis de la información almacenada en el fichero. Es, por tanto, un proceso off-line, realizado sin necesidad de ningún elemento hardware conectado al ordenador.

El gestor de cálculo finalmente calcula una serie de índices de diversos estándares nacionales e internacionales a partir de señales precisamente grabadas en un fichero de sesión (.CMG). Hay cuatro tipos de cálculos: Aislamiento, Ruido de impacto, ruido mecánico del equipo y absorción. Cada índice cumple un determinado estándar y puede ser calculado para un tipo concreto de datos de entrada.

dBBATI32 permite medir parámetros acústicos como TR, EDT, C80, C50, D50, STI y RASTI.

ANEXO B. SINTESIS DE LOS RESULTADOS MEDIDOS

B.1 RUIDO DE FONDO

F(Hz)	Sala de Control, Leq (dB)	Sala de Grabación, Leq (dB)
20	35,9	45,4
25	38,6	47,8
31	30,1	43,7
40	40,9	47,5
50	42,4	48,8
63	17	36,6
80	26,2	44,9
100	28,4	39,7
125	27,7	39,2
160	20,5	36,4
200	17,7	34,6
250	16,6	34,5
315	15,6	32,8
400	14,7	32,2
500	15,5	32,4
630	15,3	32,1
800	18,5	34,6
1000	23,6	37,5
1250	22,6	36,5
1600	20,7	34,5
2000	13,8	30,5
2500	9,9	26,4
3150	7,2	24
4000	5,9	21,8
5000	5,7	20
6300	5,4	18,4
8000	5,1	16,9
10000	3,7	15,6

12500	3,6	12,8
16000	4,7	11,1
20000	6,2	8,8
Leq (dBA)	**29,2**	**44**

Tabla B1. Nivel del ruido de fondo en bandas de tercio de octava en las salas de control y grabación.

B.2 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

B.2.1 Sala de Grabación

En la siguiente tabla, se muestran los valores del tiempo de reverberación recibidos para las 6 posiciones de micrófono en emisión de la fuente en la posición 1.

Frecuencia	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5	F1M6	Promedio	Desviación
50	1,21	1,12	1,43	1,49	1,13	1,1	1,25	0,17
63	0,82	0,82	0,81	0,46	0,95	0,77	0,77	0,17
80	1,54	0,84	1,54	1,38	1,49	0,81	1,27	0,35
100	1,26	1,28	1,42	1,28	1,33	1,14	1,28	0,09
125	1,32	1,39	1,22	1,23	1,23	1,11	1,25	0,1
160	1,34	1,28	1,4	1,33	1,32	1,24	1,32	0,05
200	1,03	0,91	1,05	1,05	1	1,03	1,01	0,05
250	0,92	0,9	0,96	1,04	0,93	0,77	0,92	0,09
315	1,19	1,05	1,2	1,24	1,03	1,22	1,15	0,09
400	1,51	1,31	1,22	1,3	1,39	1,43	1,36	0,1
500	1,29	1,27	1,22	1,29	1,28	1,18	1,25	0,05
630	1,06	1,03	1,03	1,04	1,08	0,99	1,04	0,03
800	1,37	1,37	1,32	1,38	1,33	1,39	1,36	0,03
1000	1,63	1,64	1,71	1,79	1,66	1,67	1,68	0,06
1250	1,83	1,99	1,88	1,85	1,87	1,89	1,88	0,06
1600	1,97	2,08	2	2,09	2,06	2,01	2,04	0,05
2000	2,02	1,96	2,05	2,03	2,02	2,03	2,02	0,03
2500	1,86	1,84	1,89	1,86	1,88	1,88	1,87	0,02

3150	1,7	1,73	1,74	1,69	1,73	1,71	1,71	0,02
4000	1,66	1,68	1,67	1,64	1,61	1,63	1,65	0,03
5000	1,6	1,63	1,59	1,6	1,6	1,62	1,61	0,01
6300	1,37	1,39	1,37	1,39	1,36	1,37	1,37	0,01
8000	1,11	1,08	1,12	1,13	1,09	1,11	1,1	0,02
10000	0,92	0,9	0,9	0,89	0,88	0,88	0,89	0,01
12500	0,68	0,64	0,65	0,68	0,68	0,71	0,67	0,02
16000	0,51	0,49	0,5	0,49	0,51	0,47	0,5	0,02
20000	0,43	0,39	0,39	0,42	0,42	0,37	0,4	0,02

Tabla B2. TR medido en bandas de tercio de octava cuando se mide con la fuente en la posición 1.

En la siguiente figura, se representan los valores obtenidos para cada posición de micrófono en la posición de fuente 1.

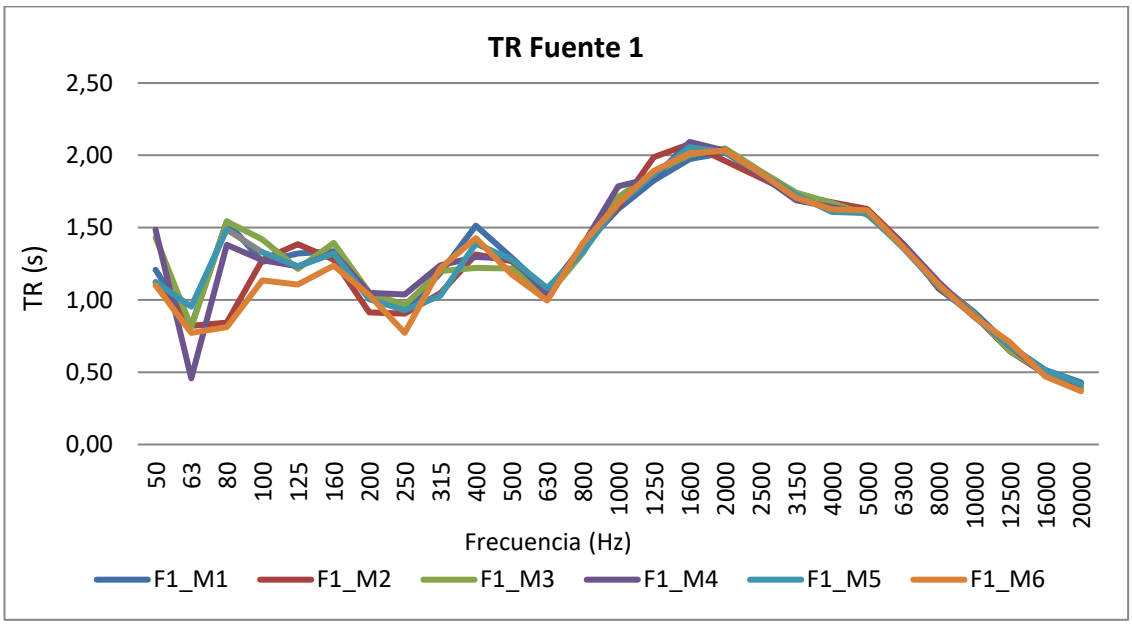


Figura B1. Gráfica del TR cuando se mide con la fuente en la posición 1.

En la siguiente tabla, se muestran los valores promedios en frecuencias del tiempo de reverberación para las distintas posicione de micrófono y en la posición 2 de la fuente.

Frecuencia	*F2M1*	*F2M2*	*F2M3*	*F2M4*	*F2M5*	*F2M6*	*Promedio*	*Desviación*
50	1,13	1,29	1,25	1,82	1,07	1,1	1,28	0,28
63	0,74	1,2	1,3	0,89	0,99	0,43	0,92	0,32
80	1,69	1,49	1,92	1,63	1,26	1,42	1,57	0,23
100	1,32	1,34	1,47	1,39	1,23	1,2	1,32	0,1
125	1,24	1,26	1,46	1,33	1,22	1,34	1,31	0,09
160	1,44	1,4	1,23	1,26	1,35	1,37	1,34	0,08
200	0,91	1,16	1	0,97	1,14	1,03	1,03	0,1
250	0,85	0,87	0,8	0,89	1,18	1,04	0,94	0,14
315	1,23	1,2	1,09	1,14	1,17	1,16	1,17	0,05
400	1,29	1,34	1,33	1,25	1,5	1,31	1,34	0,08
500	1,24	1,27	1,23	1,29	1,33	1,21	1,26	0,04
630	1,08	1,11	1,1	1,1	1,06	1,08	1,09	0,02
800	1,42	1,37	1,36	1,33	1,43	1,29	1,37	0,05
1000	1,73	1,71	1,72	1,66	1,77	1,66	1,71	0,04
1250	1,87	1,91	1,97	1,9	1,94	1,76	1,89	0,07
1600	2,03	2,01	1,96	1,94	1,91	1,9	1,96	0,05
2000	1,97	1,99	1,94	2,01	1,98	1,96	1,98	0,03
2500	1,84	1,82	1,82	1,85	1,87	1,87	1,84	0,02
3150	1,68	1,66	1,66	1,72	1,72	1,72	1,69	0,03
4000	1,64	1,61	1,6	1,57	1,67	1,7	1,63	0,05
5000	1,58	1,58	1,59	1,56	1,58	1,59	1,58	0,01
6300	1,32	1,36	1,34	1,38	1,34	1,32	1,34	0,02
8000	1,13	1,11	1,11	1,08	1,12	1,1	1,11	0,02
10000	0,92	0,88	0,89	0,89	0,88	0,9	0,89	0,01
12500	0,69	0,67	0,66	0,7	0,68	0,67	0,68	0,02
16000	0,53	0,46	0,52	0,49	0,52	0,52	0,51	0,03
20000	0,46	0,39	0,42	0,3	0,41	0,43	0,4	0,05

Tabla B3. TR medido en bandas de tercio de octava cuando se mide con la fuente en la posición 2.

En la siguiente figura, se representan los valores obtenidos para cada posición de micrófono en la posición de fuente 2.

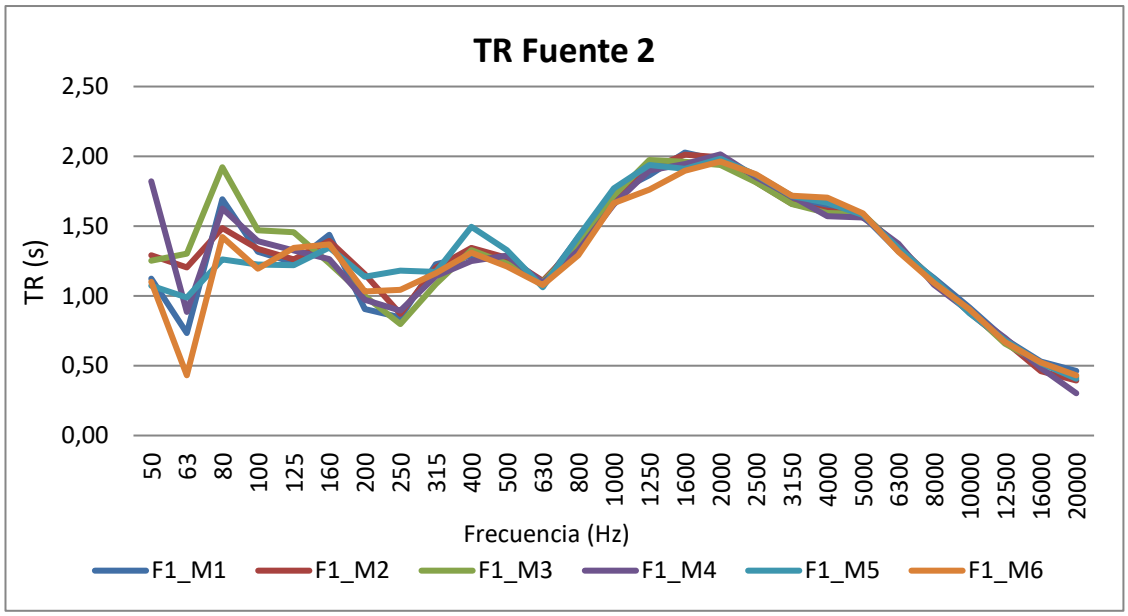


Figura B2. Gráfica del TR cuando se mide con la fuente en la posición 2.

En las siguientes figuras se muestran los valores promedios para las bandas de tercios de octava por cada posición de fuente, así como el promedio total de las dos fuentes.

Frecuencia	Promedio F1	Promedio F2	Desviación	TR_total
50	1,25	1,28	0,02	1,26
63	0,77	0,92	0,11	0,85
80	1,27	1,57	0,21	1,42
100	1,28	1,32	0,03	1,3
125	1,25	1,31	0,04	1,28
160	1,32	1,34	0,01	1,33
200	1,01	1,03	0,02	1,02
250	0,92	0,94	0,01	0,93
315	1,15	1,17	0,01	1,16
400	1,36	1,34	0,02	1,35
500	1,25	1,26	0,01	1,26
630	1,04	1,09	0,03	1,06
800	1,36	1,37	0	1,36
1000	1,68	1,71	0,02	1,69
1250	1,88	1,89	0,01	1,89
1600	2,04	1,96	0,06	2
2000	2,02	1,98	0,03	2

2500	1,87	1,84	0,02	1,86
3150	1,71	1,69	0,01	1,7
4000	1,65	1,63	0,01	1,64
5000	1,61	1,58	0,02	1,59
6300	1,37	1,34	0,02	1,36
8000	1,1	1,11	0,01	1,1
10000	0,89	0,89	0	0,89
12500	0,67	0,68	0,01	0,67
16000	0,5	0,51	0	0,5
20000	0,4	0,4	0	0,4

Tabla B4. TR promedio para las dos posiciones de fuente.

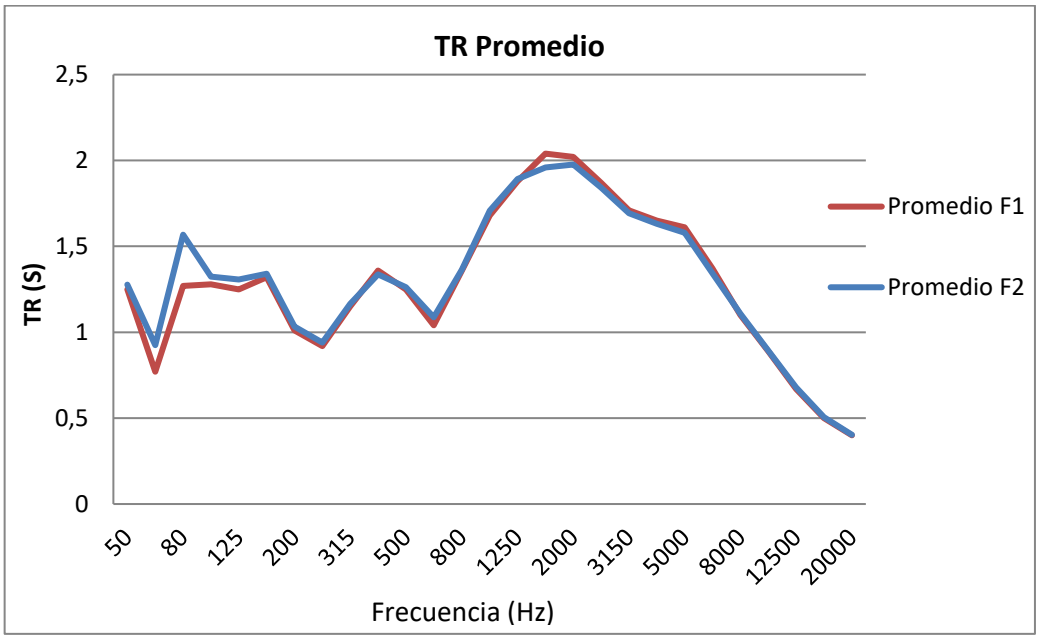


Figura B3. Gráfica del TR promedio de las dos posiciones de fuente.

B.2.2 Sala de Control

En las siguientes tablas y figuras se muestran los valores obtenidos para el tiempo de reverberación en la sala de control.

Frecuencia	F1M1	F1M2	F1M3	F1M4	F1M5	F1M6	Promedio	Desviación
50	0,72	0,65	0,84	0,71	0,70	0,84	0,74	0,08
63	1,03	0,69	0,88	0,78	0,91	1,02	0,89	0,13
80	1,23	0,81	1,25	1,04	1,04	0,84	1,03	0,18
100	1,41	1,50	1,41	1,55	1,19	1,35	1,4	0,13
125	1,70	1,64	1,63	1,66	1,66	1,67	1,66	0,02
160	1,53	1,58	1,55	1,48	1,41	1,35	1,48	0,09
200	1,28	1,20	1,21	1,14	1,20	1,27	1,21	0,05
250	1,02	1,04	1,15	1,13	0,98	1,04	1,06	0,07
315	1,38	1,58	1,38	1,42	1,49	1,56	1,47	0,09
400	1,59	1,52	1,60	1,53	1,57	1,49	1,55	0,04
500	1,64	1,46	1,60	1,50	1,75	1,59	1,59	0,1
630	1,08	1,03	1,08	1,11	1,11	1,05	1,07	0,03
800	1,31	1,26	1,33	1,24	1,3	1,23	1,28	0,04
1000	1,58	1,56	1,53	1,50	1,57	1,61	1,56	0,04
1250	1,77	1,87	1,72	1,80	1,83	1,76	1,79	0,05
1600	1,88	1,88	1,95	1,89	1,89	1,84	1,89	0,04
2000	1,86	1,87	1,92	1,86	1,92	1,97	1,9	0,04
2500	1,76	1,82	1,84	1,82	1,8	1,86	1,82	0,04
3150	1,62	1,64	1,65	1,66	1,65	1,64	1,64	0,01
4000	1,61	1,56	1,56	1,59	1,55	1,57	1,57	0,02
5000	1,60	1,59	1,54	1,55	1,56	1,55	1,56	0,02
6300	1,34	1,35	1,32	1,35	1,32	1,35	1,34	0,02
8000	1,10	1,08	1,08	1,12	1,08	1,09	1,09	0,02
10000	0,87	0,89	0,89	0,90	0,88	0,89	0,88	0,01
12500	0,67	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,67	0,01
16000	0,50	0,51	0,48	0,48	0,49	0,52	0,5	0,02
20000	0,41	0,41	0,43	0,38	0,42	0,4	0,41	0,02

Tabla B5. TR medido en bandas de tercio de octava cuando se mide con la fuente en la posición 1.

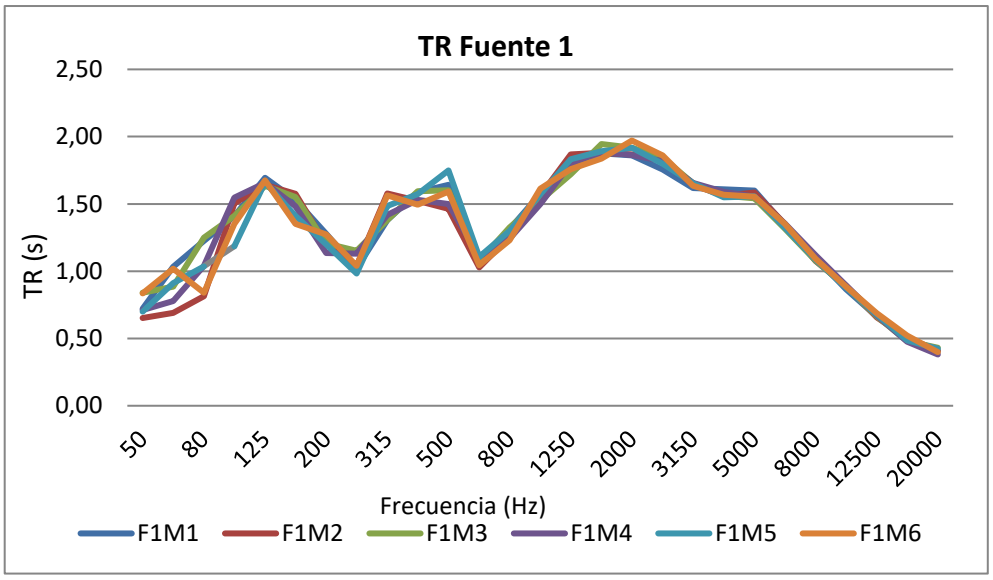


Figura B4. Gráfica del TR cuando se mide con la fuente en la posición 1.

En la siguiente tabla, se muestran los valores promedios en frecuencias del tiempo de reverberación para las distintas posicione de micrófono y en la posición 2 de la fuente.

Frecuencia	*F2M1*	*F2M2*	*F2M3*	*F2M4*	*F2M5*	*F2M6*	*Promedio*	*Desviación*
50	0,41	0,54	0,49	0,56	0,57	0,90	0,58	0,17
63	0,88	0,69	0,64	0,68	1,22	0,72	0,81	0,22
80	1,04	0,87	1,07	1,06	1,06	1,14	1,04	0,09
100	1,26	1,24	1,36	1,17	1,12	1,31	1,24	0,09
125	1,30	1,63	1,32	1,56	1,61	1,42	1,47	0,15
160	1,35	1,64	1,14	1,23	1,39	1,28	1,34	0,17
200	1,22	1,15	1,12	1,09	1,01	1,20	1,13	0,08
250	1,21	1,23	1,25	1,20	1,15	1,21	1,21	0,03
315	1,75	1,60	1,62	1,51	1,39	1,39	1,54	0,14
400	1,70	1,58	1,66	1,54	1,49	1,49	1,58	0,09
500	1,32	1,46	1,60	1,50	1,55	1,29	1,45	0,12
630	1,01	1,09	1,12	1,20	1,11	1,02	1,09	0,07
800	1,23	1,20	1,29	1,22	1,23	1,28	1,24	0,04
1000	1,56	1,60	1,62	1,61	1,57	1,58	1,59	0,02
1250	1,79	1,74	1,68	1,85	1,76	1,74	1,76	0,06
1600	1,89	1,86	1,86	1,97	1,89	1,96	1,90	0,05
2000	1,80	1,85	1,96	1,88	1,91	1,90	1,88	0,06

2500	1,82	1,82	1,84	1,83	1,81	1,82	1,82	0,01
3150	1,68	1,65	1,67	1,65	1,63	1,64	1,65	0,02
4000	1,59	1,61	1,61	1,61	1,58	1,61	1,60	0,02
5000	1,55	1,56	1,60	1,57	1,55	1,53	1,56	0,02
6300	1,32	1,31	1,33	1,33	1,36	1,37	1,34	0,02
8000	1,07	1,08	1,07	1,09	1,08	1,12	1,08	0,02
10000	0,87	0,89	0,88	0,90	0,87	0,91	0,89	0,02
12500	0,67	0,65	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,01
16000	0,49	0,50	0,49	0,52	0,49	0,49	0,50	0,01
20000	0,40	0,41	0,38	0,37	0,42	0,38	0,39	0,02

Tabla B6. TR medido en bandas de tercio de octava cuando se mide con la fuente en la posición 2.

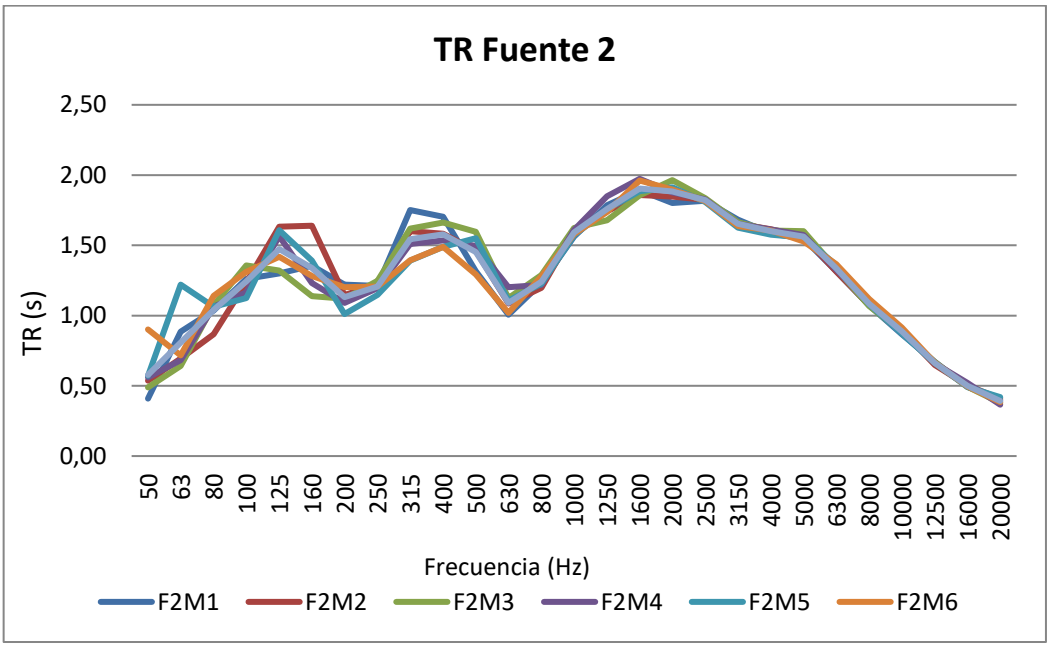


Figura B5. Gráfica del TR cuando se mide con la fuente en la posición 2.

Frecuencia	***Promedio F1***	***Promedio F2***	***Desviación***	***TR_total***
50	0,74	0,58	0,12	0,66
63	0,89	0,81	0,06	0,85
80	1,03	1,04	0	1,04
100	1,40	1,24	0,11	1,32
125	1,66	1,47	0,13	1,57
160	1,48	1,34	0,1	1,41
200	1,21	1,13	0,06	1,17
250	1,06	1,21	0,1	1,13
315	1,47	1,54	0,05	1,51
400	1,55	1,58	0,02	1,56
500	1,59	1,45	0,1	1,52
630	1,07	1,09	0,01	1,08
800	1,28	1,24	0,03	1,26
1000	1,56	1,59	0,02	1,57
1250	1,79	1,76	0,02	1,77
1600	1,89	1,90	0,01	1,9
2000	1,90	1,88	0,01	1,89
2500	1,82	1,82	0	1,82
3150	1,64	1,65	0,01	1,65
4000	1,57	1,60	0,02	1,59
5000	1,56	1,56	0	1,56
6300	1,34	1,34	0	1,34
8000	1,09	1,08	0	1,09
10000	0,88	0,89	0	0,89
12500	0,67	0,66	0,01	0,67
16000	0,50	0,50	0	0,50
20000	0,41	0,39	0,01	0,40

Tabla B7. TR promedio para las dos posiciones de fuente.

En las siguiente figura, se muestran los valores promedios para las bandas de tercios de octava por cada posición de fuente, así como el promedio total de las dos fuentes.

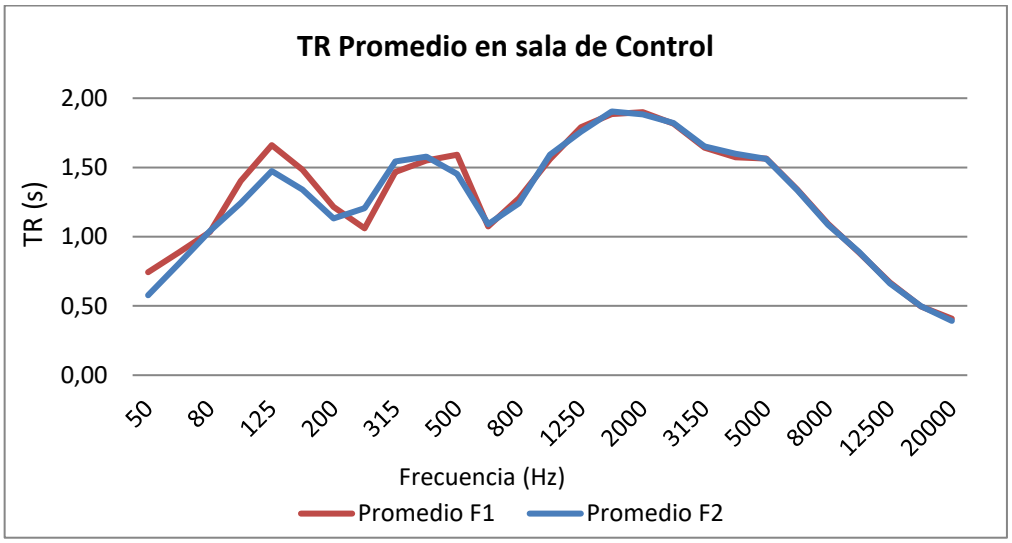


Figura B6. Gráfica del TR promedio de las dos posiciones de fuente.

B.3 AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO EN RECINTOS INTERIORES

B.3.1 Pared interior

En las siguientes tablas se representan los valores de los índices globales del cálculo de parámetros para la valoración del aislamiento acústico en la pared interior de separación entre la sala de control y grabación.

B.3.1.1 Cálculo de los valores de $D_{nT,A}$, $D_{nT,w}$ y sus términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados

En primer lugar, en la siguiente tabla se muestran los valores para el cálculo del índice global de la diferencia de niveles estandarizada, con ponderación A, $D_{n,TA}$.

F(Hz)	D (dB)	$D_{n,T}$(dB)	LAr,i (dBA)	Xa,i = 10^((LAr,i-Dn,T)/10)	$D_{n,TA}$ (dBA)
50	15,6	16,8			**-10*log (Σ[Xa,i])**
63	18,6	20,9			**34,5**
80	22	25,2			
100	20	24,2	-30,1	3,72E-06	
125	28,4	33,4	-27,1	8,91E-07	
160	27,3	31,8	-24,4	2,40E-06	
200	30,6	34,3	-21,9	2,40E-06	
250	25,4	29	-19,6	1,38E-05	
315	32,2	37	-17,6	3,47E-06	
400	30,2	35,2	-15,8	7,94E-06	
500	26,6	31,4	-14,2	2,75E-05	
630	28,6	32	-12,9	3,24E-05	
800	30,3	34,3	-11,8	2,45E-05	
1000	30	35	-11	2,51E-05	
1250	27,7	33,2	-10,4	4,37E-05	
1600	28	33,8	-10	4,17E-05	
2000	31,6	37,4	-9,8	1,91E-05	
2500	31,6	37,2	-9,7	2,04E-05	
3150	29,1	34,3	-9,8	3,89E-05	
4000	31,3	36,3	-10	2,34E-05	
5000	31,3	36,2	-10,5	2,14E-05	
6300	33,9	38,2		**Σ[Xa,i]**	
8000	36,3	39,7		0,00035272	
10000	39,9	42,4			
12500	39,9	41,1			
16000	40,4	40,4			
20000	42,2	41,2			

Tabla B8. Cálculo de valores de las diferencias de niveles estandarizada, ponderada A.

A continuación, en la siguiente tabla, se muestra el cálculo de la diferencia de niveles estandarizada ponderada, $D_{n,T,w}$.

FHz	$D_{n,T}$(dB)	Curva Referencia	Curva desplazada	Desv.desf	$D_{n,T,w}$ (dB)
100	24,2	33	15	-9,2	**34**
125	33,4	36	18	-15,4	
160	31,8	39	21	-10,8	
200	34,3	42	24	-10,3	
250	29	45	27	-2	
315	37	48	30	-7	
400	35,2	51	33	-2,2	
500	31,4	52	**34**	2,6	
630	32	53	35	3	
800	34,3	54	36	1,7	
1000	35	55	37	2	
1250	33,2	56	38	4,8	
1600	33,8	56	38	4,2	
2000	37,4	56	38	0,6	
2500	37,2	56	38	0,8	
3150	34,3	56	38	3,7	
				SUMA	
				23,4	
				<32dB	

Tabla B9. Cálculo de la diferencia de nivel estandarizada ponderada del elemento de separación común.

En las siguientes tablas, se muestra el proceso de cálculo de los términos de adaptación espectral (C y Ctr) para la diferencia de niveles estandarizada ponderada (DnT w).

FHz	Dn,T(dB)	Ref(dB) C	Ref(dB) Ctr	Xaj	Xaj,tr
100	24,2	-29	-20	4,79E-06	3,80E-05
125	33,4	-26	-20	1,15E-06	4,57E-06
160	31,8	-23	-18	2,63E-06	1,05E-05
200	34,3	-21	-16	2,95E-06	9,33E-06
250	29	-19	-15	1,58E-05	3,98E-05
315	37	-17	-14	3,98E-06	7,94E-06
400	35,2	-15	-13	9,55E-06	1,51E-05
500	31,4	-13	-12	3,63E-05	4,57E-05
630	32	-12	-11	3,98E-05	5,01E-05
800	34,3	-11	-9	2,95E-05	4,68E-05
1000	35	-10	-8	3,16E-05	5,01E-05
1250	33,2	-9	-9	6,03E-05	6,03E-05
1600	33,8	-9	-10	5,25E-05	4,17E-05
2000	37,4	-9	-11	2,29E-05	1,45E-05
2500	37,2	-9	-13	2,40E-05	9,55E-06
3150	34,3	-9	-15	4,68E-05	1,17E-05
				Σ Xaj	**Σ Xaj,tr**
				0,00038456	0,0004557
			DnT,w = 34	**34,2**	**33,4**
			Cj = -10*log (Σ) - DnT,w	**C**	**Ctr**
				0	**-1**

Tabla B10. Cálculo de los valores C y C_{tr} para la diferencia de niveles estandarizada, D_{nT}.

$C_{50\text{-}3150}$	$C_{tr50\text{-}3150}$
0	-2
$C_{50\text{-}5000}$	$C_{tr50\text{-}5000}$
0	-2
$C_{100\text{-}5000}$	$C_{tr100\text{-}5000}$
1	-1
C	**Ctr**
0	**-1**

Tabla B11. Términos de adaptación espectral ampliados para la diferencia de niveles estandarizada $D_{n,T,A}$.

B.3.1.2 Cálculo de los valores de R_A, R_w y sus términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados

A continuación, se procede al cálculo de los índices de reducción sonora y términos de adaptación espectral de los elementos constructivos de la pared a estudiar, ventana acústica y tabique de PYL.

En primer lugar, en la siguiente tabla, se muestran los valores de la ventana de observación que separa la sala de control y grabación. La superficie que forma el acristalado tiene un total de 1,1 m².

F(Hz)	R (dB)	LAr,i(dBA)	10^((LAr,i-R)/10)	Curva Referencia	Curva desplazada	Desv.desf
100	14,5	-30,1	3,47E-05	33	6	-8,5
125	23,7	-27,1	8,32E-06	36	9	-14,7
160	22,1	-24,4	2,24E-05	39	12	-10,1
200	24,6	-21,9	2,24E-05	42	15	-9,6
250	19,3	-19,6	0,0001	45	18	-1,3
315	27,3	-17,6	3,24E-05	48	21	-6,3
400	25,4	-15,8	7,59E-05	51	24	-1,4
500	21,7	-14,2	0,0002	52	25	3,3
630	22,2	-12,9	0,0003	53	26	3,8
800	24,6	-11,8	0,0002	54	27	2,4
1000	25,3	-11	0,0002	55	28	2,7
1250	23,5	-10,4	0,0004	56	29	5,5
1600	24,1	-10	0,0004	56	29	4,9
2000	27,7	-9,8	0,0002	56	29	1,3
2500	27,5	-9,7	0,0002	56	29	1,5
3150	24,6	-9,8	0,0004	56	29	4,4
4000	26,6	-10	0,0002			**Suma = 29,8**
5000	26,5	-10,5	0,0002			**<32dB**
			Σ10^((L$_{A,i}$-R)/10)			
			0,0033	**R_A = 24,8 dBA**	**R_w = 25 dB**	

Tabla B12. Cálculo de los índices de reducción acústica de la ventana acústica de observación.

En las siguientes tablas, se muestra el proceso de cálculo de los términos de adaptación espectral (C y C_{tr}) para el índice de reducción acústica de la ventana (R_w).

FHz	R (dB)	Ref(dB) C	Ref(dB) Ctr	X_{aj}	$X_{aj,tr}$
100	14,5	-29	-20	4,47E-05	3,55E-04
125	23,7	-26	-20	1,07E-05	4,27E-05
160	22,1	-23	-18	2,45E-05	9,77E-05
200	24,6	-21	-16	2,75E-05	8,71E-05
250	19,3	-19	-15	1,48E-04	3,72E-04
315	27,3	-17	-14	3,72E-05	7,41E-05
400	25,4	-15	-13	9,12E-05	1,45E-04
500	21,7	-13	-12	3,39E-04	4,27E-04
630	22,2	-12	-11	3,80E-04	4,79E-04
800	24,6	-11	-9	2,75E-04	4,37E-04
1000	25,3	-10	-8	2,95E-04	4,68E-04
1250	23,5	-9	-9	5,62E-04	5,62E-04
1600	24,1	-9	-10	4,90E-04	3,89E-04
2000	27,7	-9	-11	2,14E-04	1,35E-04
2500	27,5	-9	-13	2,24E-04	8,91E-05
3150	24,6	-9	-15	4,37E-04	1,10E-04
				ΣX_{aj}	**$\Sigma X_{aj,tr}$**
				0,0036	0,0046
			R_w = 25	**24,4**	**23,7**
			C_j = -10*log (Σ) - R_w	**C**	**Ctr**
				-1	**-1**

Tabla B13. Cálculo de los valores C y Ctr para el índice de reducción sonora de la ventana, R.

$C_{50-3150}$	$C_{tr50-3150}$
-1	-2
$C_{50-5000}$	$C_{tr50-5000}$
0	-2
$C_{100-5000}$	$C_{tr100-5000}$
0	-1
C	**C_{tr}**
-1	**-1**

Tabla B14. Términos de adaptación espectral ampliados para los índices de reducción acústica de la ventana.

A continuación, se muestran los valores de los índices de reducción sonora del tabique de PYL que separa la sala de control y grabación. El área de separación que lo forma tiene un total de 6,42 m².

FHz	R (dB)	LAr,i(dBA)	10^((LAr,i-R)/10)	Curva Referencia	Curva desplazada	Desv.desf
100	22,2	-30,1	5,89E-06	33	13	-9,2
125	31,3	-27,1	1,45E-06	36	16	-15,3
160	29,8	-24,4	3,80E-06	39	19	-10,8
200	32,3	-21,9	3,80E-06	42	22	-10,3
250	26,9	-19,6	2,24E-05	45	25	-1,9
315	34,9	-17,6	5,62E-06	48	28	-6,9
400	33,1	-15,8	1,29E-05	51	31	-2,1
500	29,4	-14,2	4,37E-05	52	32	2,6
630	29,9	-12,9	5,25E-05	53	33	3,1
800	32,3	-11,8	3,89E-05	54	34	1,7
1000	32,9	-11	4,07E-05	55	35	2,1
1250	31,2	-10,4	6,92E-05	56	36	4,8
1600	31,7	-10	6,76E-05	56	36	4,3
2000	35,3	-9,8	3,09E-05	56	36	0,7
2500	35,2	-9,7	3,24E-05	56	36	0,8
3150	32,2	-9,8	6,31E-05	56	36	3,8
4000	34,3	-10	3,72E-05			**Suma = 23,9**

5000	34,2	-10,5	3,39E-05			**<32dB**
			Σ10^((LAr,i-R)/10)			
			0,00056579	**RA = 32,5 dBA**	**Rw = 32 dB**	

Tabla B15. Cálculo de los índices de reducción acústica del tabique de PYL.

B.3.2 Pared principal

Como en el apartado anterior, se procede al cálculo de los parámetros de aislamiento acústico globales del tabique y los índices de reducción acústica de los elementos constructivos que lo componen.

B.3.2.1 Cálculo de los valores de $D_{nT,A}$, $D_{nT,w}$ y sus términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados

En primer lugar, se representan las diferencias de niveles estandarizados globales de todo el elemento separador, con ponderación A referente a ruido rosa y la referencia ponderada indicada por la norma 717-1.

FHz	D (dB)	Dn,T(dB)	LAr,i (dBA)	Xa,i = 10^((LAr,i-Dn,T)/10)	Dn,TA (dBA)
50	28,4	32,4			**-10*log (Σ[Xa,i])**
63	19,5	21,8			**36,1**
80	23,4	27,9			
100	27,9	32,1	-30,1	6,03E-07	
125	26,5	30,6	-27,1	1,70E-06	
160	31,3	35,5	-24,4	1,02E-06	
200	35,9	39	-21,9	8,13E-07	
250	29,7	32,4	-19,6	6,31E-06	
315	30,4	34,1	-17,6	6,76E-06	

400	33,9	38,2	-15,8	3,98E-06
500	31,2	35,2	-14,2	1,15E-05
630	30,3	33,6	-12,9	2,24E-05
800	31,1	35,5	-11,8	1,86E-05
1000	29,3	34,6	-11	2,75E-05
1250	26,7	32,5	-10,4	5,13E-05
1600	28,4	34,4	-10	3,63E-05
2000	32,9	38,9	-9,8	1,35E-05
2500	34,1	39,8	-9,7	1,12E-05
3150	33,6	38,9	-9,8	1,35E-05
4000	36	41,2	-10	7,59E-06
5000	35,4	40,4	-10,5	8,13E-06
6300	37,1	41,4		**Σ[Xa,i]**
8000	40,6	44		0,00024273
10000	49,3	51,8		
12500	52,3	53,6		
16000	48,5	48,5		
20000	46,8	45,9		

Tabla B16. Valores de la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A.

FHz	Dn,T(dB)	Curva Referencia	Curva desplazada	Desv.desf	Dn,T,w (dB)
100	32,1	33	17	-15,1	**36**
125	30,6	36	20	-10,6	
160	35,5	39	23	-12,5	
200	39	42	26	-13	
250	32,4	45	29	-3,4	
315	34,1	48	32	-2,1	
400	38,2	51	35	-3,2	
500	35,2	52	**36**	0,8	
630	33,6	53	37	3,4	
800	35,5	54	38	2,5	
1000	34,6	55	39	4,4	
1250	32,5	56	40	7,5	
1600	34,4	56	40	5,6	
2000	38,9	56	40	1,1	
2500	39,8	56	40	0,2	
3150	38,9	56	40	1,1	

SUMA
26,6
<32dB

Tabla B17. Valores de la diferencia de niveles estandarizada ponderado, DnT, w.

En la siguiente tabla se muestran los términos de adaptación espectral C, Ctr y los términos ampliados para la diferencia de niveles estandarizada, DnT.

C	C_{tr}
-1	-1
$C_{50-3150}$	$C_{tr50-3150}$
-1	-2
$C_{50-5000}$	$C_{tr50-5000}$
0	-2
$C_{100-5000}$	$C_{tr100-5000}$
0	-1

Tabla B18. Términos de adaptación espectral ampliados para la diferencia de niveles estandarizada.

B.3.2.2 Cálculo de los valores de R_A, R_w y sus términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados

A continuación, se muestran los valores de reducción sonora calculados para los distintos elementos constructivos que forman el elemento de separación vertical. En este caso, la separación está formada por un tabique de PYL y una puerta acústica.

F(Hz)	R (dB)	$L_{Ar,i}$ (dBA)	10^(($L_{Ar,i}$-R)/10)	Curva Referencia	Curva desplazada	Desv.desf
100	29,9	-30,1	1,00E-06	33	15	-14,9
125	28,4	-27,1	2,82E-06	36	18	-10,4
160	33,4	-24,4	1,66E-06	39	21	-12,4
200	36,9	-21,9	1,32E-06	42	24	-12,9
250	30,2	-19,6	1,05E-05	45	27	-3,2
315	31,9	-17,6	1,12E-05	48	30	-1,9
400	36,1	-15,8	6,46E-06	51	33	-3,1
500	33,1	-14,2	1,86E-05	52	34	0,9
630	31,4	-12,9	3,72E-05	53	35	3,6
800	33,3	-11,8	3,09E-05	54	36	2,7
1000	32,5	-11	4,47E-05	55	37	4,5
1250	30,3	-10,4	8,51E-05	56	38	7,7
1600	32,3	-10	5,89E-05	56	38	5,7
2000	36,8	-9,8	2,19E-05	56	38	1,2
2500	37,6	-9,7	1,86E-05	56	38	0,4
3150	36,8	-9,8	2,19E-05	56	38	1,2
4000	39	-10	1,26E-05			**Suma = 27,9**
5000	38,3	-10,5	1,32E-05			**<32dB**
			Σ10^(($L_{A,i}$-R)/10)	**R_A = -10*log(Σ)**		
			0,0004	**R_A = 34 dBA**	**R_w = 34 dB**	

Tabla 19. Índices de reducción acústica del tabique de PYL.

F(Hz)	R (dB)	$L_{Ar,i}$ (dBA)	10^(($L_{Ar,i}$-R)/10)	Curva Referencia	Curva desplazada	Desv.desf
100	24	-30,1	3,89E-06	33	9	-15
125	22,5	-27,1	1,10E-05	36	12	-10,5
160	27,5	-24,4	6,46E-06	39	15	-12,5
200	30,9	-21,9	5,25E-06	42	18	-12,9
250	24,3	-19,6	4,07E-05	45	21	-3,3
315	26	-17,6	4,37E-05	48	24	-2
400	30,1	-15,8	2,57E-05	51	27	-3,1
500	27,1	-14,2	7,41E-05	52	28	0,9
630	25,5	-12,9	1,45E-04	53	29	3,5
800	27,4	-11,8	1,20E-04	54	30	2,6
1000	26,5	-11	1,78E-04	55	31	4,5
1250	24,4	-10,4	3,31E-04	56	32	7,6
1600	26,3	-10	2,34E-04	56	32	5,7
2000	30,8	-9,8	8,71E-05	56	32	1,2
2500	31,7	-9,7	7,24E-05	56	32	0,3
3150	30,8	-9,8	8,71E-05	56	32	1,2
4000	33,1	-10	4,90E-05			**Suma = 27,5**
5000	32,4	-10,5	5,13E-05			**<32dB**
			Σ10^(($L_{A,i}$-R)/10)	**R_A = -10*log(Σ)**		
			0,00156584	**R_A = 28,1 dBA**	**R_w = 28 dB**	

Tabla B20. Índices de reducción sonora de la puerta acústica.

C	Ctr
-1	**-1**
$C_{50-3150}$	**$C_{tr50-3150}$**
-1	-2
$C_{50-5000}$	**$C_{tr50-5000}$**
0	-2
$C_{100-5000}$	**$C_{tr100-5000}$**
0	-1

Tabla B21. Términos de adaptación espectral ampliados de la reducción acústica del elemento de separación vertical global.

B.4 AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE FACHADAS

Comentar que se necesitó la corrección del nivel de ruido de fondo en el recinto receptor (sala de grabación), se muestra en la siguiente tabla.

F (Hz)	*L_{R1} (dB)*	*RF Grabación L_{B2} (dB)*	*L_{R2} (dB)*
50	36,2	48,8	48,8
63	32,2	36,6	34,6
80	31,5	44,9	44,7
100	36	39,7	37,3
125	38,3	39,2	31,9
160	38,2	36,4	37
200	40,3	34,6	39,1
250	37,8	34,5	36,5
315	41,2	32,8	40,5
400	38,6	32,2	37,3
500	34,3	32,4	33,1
630	32,5	32,1	31,2
800	31,6	34,6	31
1000	32,8	37,5	32,2
1250	32,7	36,5	32
1600	33,5	34,5	32,7
2000	31,5	30,5	30,2
2500	32,8	26,4	31,5
3150	33	24	31,7
4000	30,7	21,8	29,4
5000	31	20	31
6300	30,8	18,4	30,8
8000	31,6	16,9	31,6
10000	32,6	15,6	32,6
12500	33,8	12,8	33,8
16000	35,1	11,1	35,1
20000	35,8	8,8	35,8

Tabla B22. Valores del nivel recibido con corrección del ruido de fondo.

B.4.1 Cálculo de los valores de $D_{2mnT,A}$, $D_{2mnT,Atr}$ y sus términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados

En primer lugar, a partir de los niveles de presión sonora emitidos, recibidos, y tiempo de reverberación calculado en el recinto receptor, se calcula la diferencia de niveles (D_{2m}) y la diferencia de niveles estandarizada ($D_{2m, nT}$).

F(Hz)	D2m(dB)	TR sala Grabación	D2m, nT(dB)
50	21,1	1,26	25,1
63	31,8	0,85	34,1
80	39,1	1,42	43,6
100	37	1,3	41,2
125	31,9	1,28	36
160	38,6	1,33	42,8
200	36,9	1,02	40
250	34,1	0,93	36,8
315	35,4	1,16	39,1
400	40,5	1,35	44,8
500	45,9	1,26	49,9
630	44,3	1,06	47,6
800	42,3	1,36	46,7
1000	45,8	1,7	51,1
1250	41,8	1,89	47,6
1600	43,5	2	49,5
2000	43,2	2	49,2
2500	39,3	1,86	45
3150	38,8	1,7	44,1
4000	39,1	1,64	44,3
5000	37	1,59	42
6300	36,5	1,36	40,8
8000	36,5	1,11	39,9
10000	29,6	0,89	32,1
12500	21,9	0,68	23,2
16000	19,2	0,5	19,2
20000	15	0,4	14,1

Tabla B23. Diferencia de niveles estandarizada para el método global en fachadas.

F(Hz)	Espectro normalizado del ruido rosa ponderado A. $L_{ar,i}$	$D_{2m,nT}$ (dB)	$10^{((L_{ar,i}-D_{2m,nT})/10)}$
100	-30,1	41,2	7,48E-08
125	-27,1	36	4,92E-07
160	-24,4	42,8	1,89E-07
200	-21,9	40	6,44E-07
250	-19,6	36,8	2,29E-06
315	-17,6	39,1	2,16E-06
400	-15,8	44,8	8,69E-07
500	-14,2	49,9	3,89E-07
630	-12,9	47,6	8,96E-07
800	-11,8	46,7	1,43E-06
1000	-11	51,1	6,16E-07
1250	-10,4	47,6	1,60E-06
1600	-10	49,5	1,12E-06
2000	-9,8	49,2	1,25E-06
2500	-9,7	45	3,39E-06
3150	-9,8	44,1	4,05E-06
4000	-10	44,3	3,75E-06
5000	-10,5	42	5,58E-06
			$\Sigma 10^{((L_{ar,i}-D_{2m,nT})/10)}$
			3,08E-05
		$D_{2m,nT,A}$ = -10*log (suma)	**$D_{2m,nT,A}$ = 45,1 dBA**

Tabla B24. Diferencia de niveles estandarizada para ruido aéreo con ponderación A.

F(Hz)	Espectro normalizado del ruido rosa ponderado A para automóviles, L_{atr}	$D_{2m,nT}$ (dB)	$10^{((L_{atr,i}-D_{2m,nT})/10)}$
100	-20	41,2	7,66E-07
125	-20	36	2,53E-06
160	-18	42,8	8,23E-07
200	-16	40	2,50E-06
250	-15	36,8	6,61E-06
315	-14	39,1	4,95E-06
400	-13	44,8	1,66E-06
500	-12	49,9	6,45E-07
630	-11	47,6	1,39E-06
800	-9	46,7	2,72E-06

1000	-8	51,1	1,23E-06
1250	-9	47,6	2,20E-06
1600	-10	49,5	1,12E-06
2000	-11	49,2	9,51E-07
2500	-13	45	1,59E-06
3150	-15	44,1	1,22E-06
4000	-16	44,3	9,43E-07
5000	-18	42	9,93E-07
			Σ10^ ((Latr, i-D2m, nT)/10)
			3,48E-05
		D2m, nT,Atr = -10*log (suma)	**D2m,nT,Atr = 44,6 dBA**

Tabla B25. Diferencia de niveles estandarizada para ruido aéreo con ponderación A.

B.4.2 Cálculo de los valores de R´$_{45,w}$ y sus términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados

A continuación, se procede al cálculo de las mediciones para el método por elementos.

En la siguiente tabla, se muestran los índices de reducción acústica de las ventanas acústicas como elemento de ensayo calculado según el método por elementos, con una superficie de 0,552 m².

F (Hz)	R´$_{45}$ (dB)	Curva Referencia	Curva desplazada	Desv.desf	R´$_{45, w}$
100	26	33	12	-14,02	**31 dB**
125	20,8	36	15	-5,834	
160	27,7	39	18	-9,701	
200	24,9	42	21	-3,871	
250	21,7	45	24	2,3452	
315	23,9	48	27	3,0897	

400	29,7	51	30	0,335	
500	34,8	52	31	-3,763	
630	32,4	53	32	-0,434	
800	31,5	54	33	1,4874	
1000	36	55	34	-1,96	
1250	32,4	56	35	2,5733	
1600	34,4	56	35	0,6269	
2000	34,1	56	35	0,9264	
2500	29,9	56	35	5,1465	
3150	29	56	35	6,0202	
			SUMA	22,551	**<32dB**

Tabla B26. Índices globales de reducción acústica de la muestra de ensayo.

C	**C_{tr}**
0	-1
$C_{100-5000}$	**$C_{tr100-5000}$**
-1	-2
$C_{50-5000}$	**$C_{tr50-5000}$**
-1	-3
$C_{50-3150}$	**$C_{tr50-3150}$**
0	-3

Tabla B27 Términos de adaptación espectral ampliados de la muestra de ensayo.

B.5 AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTO

A continuación, se procede a mostrar el cálculo de los parámetros acústicos para la valoración del aislamiento a ruido de impactos.

B.5.1 Cálculo de los valores de $L_{nT,w}$ y C_I

En primer lugar, en la siguiente tabla se representan los valores del nivel recibido estandarizado, **L'_{nT},** para cada banda de frecuencia.

F(Hz)	RF L_{B2} (dB)	Li recibido (dB)	TR_Control	L'_{nT}
50	31,3	48,3	0,66	47,1
63	20,5	49,2	0,85	46,9
80	18,1	50	1,04	46,8
100	21,4	52,5	1,32	48,3
125	18,6	54	1,57	49
160	18,5	62,2	1,41	57,7
200	18,9	68,7	1,17	65
250	19,4	69	1,13	65,4
315	20	66,3	1,51	61,5
400	20,7	60,3	1,56	55,3
500	21,4	53,5	1,52	48,7
630	22,2	60,3	1,08	56,9
800	23	61,2	1,26	57,2
1000	23,8	60,6	1,57	55,6
1250	24,8	61,5	1,77	56
1600	25,5	64,4	1,9	58,6
2000	26,4	63,7	1,89	57,9
2500	28,7	61,2	1,82	55,6
3150	28,2	65,5	1,65	60,3
4000	29	65,4	1,59	60,4
5000	31	60,3	1,56	55,4
6300	30,8	52,5	1,34	48,2
8000	31,7	44,9	1,09	41,5
10000	32,6	37,5	0,89	35

12500	33,8	34	0,67	32,8
16000	35	33,9	0,5	33,9
20000	35,9	34,6	0,4	35,6

Tabla B28. Valores obtenidos del nivel de presión acústica estandarizado del ruido de impactos

F (Hz)	L'_{nT}	Ref (dB)	Ref.despl (dB)	Desv.desf	$L`_{nT,w}$
100	48,3	62	58	9,72	**56**
125	49	62	58	8,96	
160	57,7	62	58	0,31	
200	65	62	58	-7	
250	65,4	62	58	-7,45	
315	61,5	62	58	-3,51	
400	55,3	61	57	1,65	
500	48,7	60	56	7,33	
630	56,9	59	55	-1,95	
800	57,2	58	54	-3,19	
1000	55,6	57	53	-2,62	
1250	56	54	50	-6	
1600	58,6	51	47	-11,6	
2000	57,9	48	44	-13,9	
2500	55,6	45	41	-14,6	
3150	60,3	42	38	-22,3	
			Suma	**28 < 32 dB**	

Tabla B29. Cálculo de la magnitud global de presión acústica ponderada, $L_{nT,w}$.

F(Hz)	L'_{nT}	Xi = 10^(L'_{nT}/10)	$L_{nT,sum}$	$C_{I,50-2500}$
50	47,1	5,12E+04	10*log(ΣXi)	$L'_{n,Tsum}$ - 15- $L'_{nT,w}$
63	46,9	4,91E+04	71 dB	**0**
80	46,8	4,82E+04	$L'_{nT,w}$	
100	48,3	6,73E+04	56 dB	
125	49	8,01E+04		
160	57,7	5,88E+05		
200	65	3,16E+06		

250	65,4	3,50E+06
315	61,5	1,42E+06
400	55,3	3,43E+05
500	48,7	7,36E+04
630	56,9	4,95E+05
800	57,2	5,24E+05
1000	55,6	3,65E+05
1250	56	3,98E+05
1600	58,6	7,27E+05
2000	57,9	6,20E+05
2500	55,6	3,62E+05
		Σ Xi = Σ10^(L´$_{nT}$/10)
		1,29E+07

Tabla B30. Cálculo del término de adaptación espectral para ruido de impactos, CI.

B.5.2 Contribución de la máquina de impactos al ruido aéreo

F (Hz)	$L_{S,tm}$	$L_{D,spk}$	$L_{R,tm}$	$L_{S,tm}$ - $L_{D,spk}$	<=	$L_{R,tm}$ - 10
50	58,3	64,6	48,3	-6,3	cumple	38,3
63	50,3	55,9	49,2	-5,6	cumple	39,2
80	63,4	76	50	-12,6	cumple	40
100	65,1	78,3	52,5	-13,2	cumple	42,5
125	71,1	87,9	54	-16,8	cumple	44
160	82,4	93,7	62,2	-11,3	Cumple	52,2
200	88,7	94,8	68,7	-6,1	Cumple	58,7
250	93,2	93,1	69	0,1	Cumple	59
315	85,5	96,9	66,3	-11,4	Cumple	56,3
400	80,7	96	60,3	-15,3	Cumple	50,3
500	78,6	92,3	53,5	-13,7	Cumple	43,5
630	87,8	90,1	60,3	-2,3	Cumple	50,3
800	88,3	91,1	61,2	-2,8	Cumple	51,2
1000	85,7	91,1	60,6	-5,4	Cumple	50,6
1250	83,3	90,9	61,5	-7,6	Cumple	51,5
1600	81,5	91,1	64,4	-9,6	Cumple	54,4

2000	80,3	91,6	63,7	-11,3	Cumple	53,7
2500	80	89	61,2	-9	Cumple	51,2
3150	83,2	86,4	65,5	-3,2	Cumple	55,5
4000	83,6	83,4	65,4	0,2	Cumple	55,4
5000	79,1	81,1	60,3	-2	Cumple	50,3

Tabla B31. Cálculo de la contribución de la máquina de impactos al ruido aéreo.

Como puede apreciarse en la tabla 34, la influencia del ruido aéreo producido por la máquina de impactos se puede considerar despreciable para toda la banda de frecuencias.

B.6 CRITERIO DE SALAS

B.6.1 Tiempo de reverberación

Las siguientes tablas recogen los valores medidos del tiempo de reverberación, para las 9 bandas de frecuencia comprendidas entre 63 y 16000 Hz.

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Micro1	1,19	1,24	1,04	1,23	1,69	1,94	1,61	1,23	0,60
Micro2	1,17	1,55	1,15	1,34	1,75	1,98	1,64	1,19	0,62
Micro3	1,09	1,48	0,96	1,14	1,72	1,95	1,57	1,10	0,57
Micro4	1,07	1,34	1,04	1,15	1,67	1,94	1,62	1,19	0,59
Micro5		1,45	1,00	1,42	1,67	1,90	1,51	1,08	0,56
Micro6	1,15	1,30	0,92	1,30	1,73	1,92	1,57	1,16	0,58
Media (s)	1,13	1,39	1,02	1,26	1,71	1,94	1,58	1,16	0,59

Tabla B32. Valores del TR en la sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava.

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Micro1	0,92	1,58	1,47	1,48	1,57	1,86	1,56	1,16	0,60
Micro2	1,39	1,81	1,26	1,38	1,58	1,86	1,54	1,12	0,58
Micro3	1,31	1,57	1,21	1,30	1,57	1,86	1,55	1,11	0,61
Micro4	0,75	1,53	1,17	1,34	1,52	1,83	1,50	1,13	0,56
Micro5	1,28	1,28	1,38	1,39	1,58	1,88	1,56	1,15	0,58
Micro6	0,84	1,39	1,32	1,44	1,53	1,83	1,52	1,13	0,58
Media (s)	1,08	1,53	1,30	1,39	1,56	1,85	1,54	1,13	0,59
Medidas TR (s)	0,85	1,43	1,27	1,39	1,54	1,87	1,60	1,10	0,52

Tabla B33. Valores del TR en la sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava.

B.6.2 EDT

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Micro1	1,19	2,38	1,03	1,54	1,13	1,96	1,43	1,11	0,64
Micro2	1,41		3,66	0,87	1,49	1,99	1,64	1,17	0,62
Micro3	1,33	0,83	1,27	1,08	1,4	1,75	1,68	1,16	0,56
Micro4	1,21	0,3	1,16	1,46	1,64	2,19	1,8	1,18	0,57
Micro5		1,39	1,3	0,82	1,55	1,99	1,62	1,26	0,57
Micro6	1,01	2,06	0,69	0,93	1,43	1,94	1,62	1,05	0,49
Media (s)	1,23	1,39	1,52	1,12	1,44	1,97	1,63	1,15	0,58

Tabla B34. Valores del EDT en sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava.

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Micro1	0,82	2,55	1,34	1,25	1,45	1,77	1,67	1,29	0,51
Micro2	0,81		0,77	1,37	1,16	1,90	1,55	1,13	0,53
Micro3	1,25		0,91	1,21	1,62	1,99	1,61	1,17	0,55
Micro4	0,63	1,82	0,65	1,40	1,53	1,91	1,59	1,24	0,53
Micro5	0,55	2,14	0,96	1,44	1,16	1,65	1,70	1,14	0,50
Micro6	0,81	2,34	0,70	1,10	1,05	1,75	1,67	1,14	0,61
Media (s)	0,81	2,21	0,89	1,30	1,33	1,83	1,63	1,18	0,54

Tabla B35. Valores del EDT en sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava.

B.6.3 Definición, D_{50}

Las siguientes tablas se recogen los valores medios de D_{50}, para las 9 bandas de frecuencia comprendidas entre 63 y 16000 Hz.

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Micro1	41,09	40,62	55,47	46,05	40,77	31,97	37,20	51,63	69,06
Micro2	56,41	39,26	64,58	59,15	50,75	32,70	36,04	48,16	71,01
Micro3	47,88	28,54	53,62	56,90	40,03	30,69	34,20	49,09	77,15
Micro4	41,98	56,05	49,32	37,91	39,51	23,76	29,93	54,00	73,89
Micro5	11,51	22,43	51,44	53,50	34,79	31,23	31,22	47,46	75,03

Micro6	40,40	40,67	58,52	47,39	39,09	35,18	36,97	52,56	80,18
Media (%)	39,88	37,93	55,49	50,15	40,82	30,92	34,26	50,48	74,39

Tabla B36. Valores D-50 en sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava.

F (Hz)	***63***	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
Micro1	77,27	40,75	49,90	39,31	36,49	29,24	37,17	42,90	74,31
Micro2	58,86	33,50	52,75	46,29	35,80	30,72	36,56	54,16	80,53
Micro3	33,25	33,90	57,61	46,27	38,71	35,90	36,80	45,93	77,87
Micro4	56,28	35,51	66,39	39,58	36,65	30,02	39,67	48,85	79,03
Micro5	32,26	22,00	44,00	43,29	36,08	39,06	36,11	52,86	83,25
Micro6	43,45	36,03	53,83	40,05	41,04	31,52	34,40	45,42	71,29
Media (%)	50,23	33,62	54,08	42,47	37,46	32,74	36,79	48,35	77,71

Tabla B37. Valores D-50 en sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava.

B.6.4 Claridad musical, C_{80}

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de las mediciones realizadas en las dos salas del estudio de sonido.

F (Hz)	***63***	***125***	***250***	***500***	***1000***	***2000***	***4000***	***8000***	***16000***
Micro1	-0,50	0,90	4,10	1,40	1,50	-0,30	0,60	2,60	7,20
Micro2	3,30	4,10	5,00	3,80	2,20	-1,00	0,10	1,90	7,90
Micro3	1	-0,3	4,3	3,9	0,5	-0,6	-0,3	2,4	8,9
Micro4	1	2,2	3,5	1,4	0,5	-1,7	-1,1	3	8,6
Micro5	-3,3	0,6	2,7	4,1	0,3	-1,1	-0,7	1,9	9,1
Micro6	2,5	2	4,4	3,3	1,3	-0,3	0,3	3	9,5
Media	0,67	1,58	4,00	2,98	1,05	-0,83	-0,18	2,47	8,53

Tabla B38. Valores C80 en sala de grabación de las medidas para las distintas bandas de octava.

F (Hz)	*63*	*125*	*250*	*500*	*1000*	*2000*	*4000*	*8000*	*16000*
Micro1	6,6	0,5	4,4	1,5	0,5	-1	0	1,9	8,5
Micro2	4,1	0,4	5,1	2,2	0,9	-0,6	0	3	9,4
Micro3	0,3	0,2	4,8	1,8	0,3	-0,6	0,8	2	8,9
Micro4	3,7	0,4	6,1	1,2	-0,1	-0,9	0,6	2,1	8,9
Micro5	4,7	-0,4	2,3	2,6	1,2	-0,2	0	2,8	10,3
Micro6	4,9	-1,1	5,4	1,9	2,4	-0,8	0,1	2,1	7,8
Media	4,05	0,00	4,68	1,87	0,87	-0,68	0,25	2,32	8,97

Tabla B39. Valores C80 en sala de control de las medidas para las distintas bandas de octava.

ANEXO C: CATT ACOUSTICS v9.1b

A.1 INTRODUCCIÓN

A continuación, se va a describir los elementos más importantes del programa, así como algunos consejos útiles para el manejo del mismo.

A.1.1 File/Preferences.

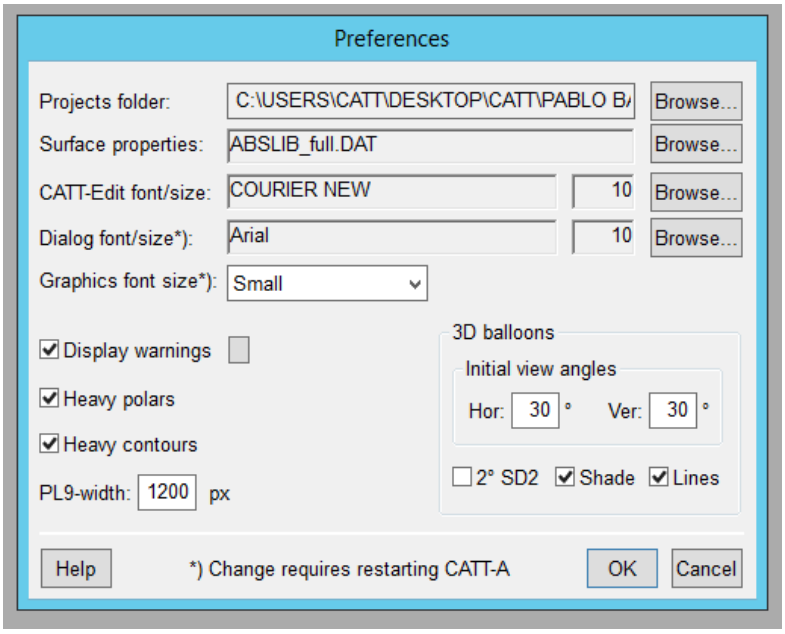


Figura C1. Preferencias por defecto.

- **Surface properties:** Es la librería que usamos para las propiedades de las superficies, podemos introducir nuestras propias librerías.

- **Display warning:**

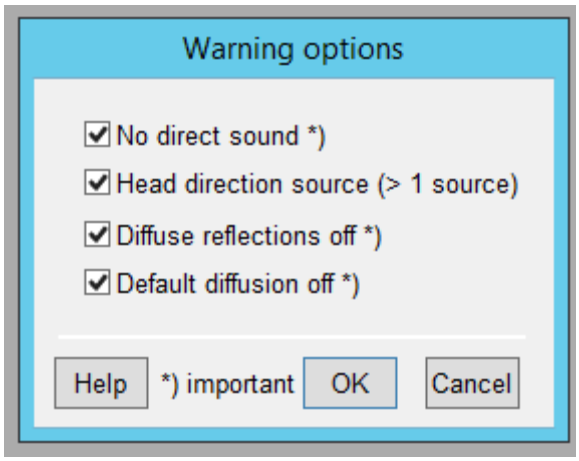


Figura C2. Warning options.

Se puede decidir el tipo de mensajes de error que aparezcan al realizar la simulación, es muy interesante en la primera simulación pedir todos mensajes, de forma que se pueda ver si tenemos que modificar algún parámetro de la simulación. También nos ayuda a ver si tenemos alguna superficie mal definida. Es muy importante asegurase de que ninguna de las superficies tenga la normal mal definida, así como que la habitación a simular este abierta.

- **Rango de frecuencias**

Todos los cálculos se realizan para ocho bandas de octava: 125 a 16k Hz. En algunos casos el cálculo es también hecho para la suma de potencia lineal o ponderada A de estas ocho bandas. Si no hay datos disponibles para 8k y 16k Hz, la extrapolación se realiza a partir de los valores de 2k y 4k Hz. [22]

En la teoría acústica geométrica las dos octavas más bajas no serán bien predichas. Para habitaciones pequeñas como salas de control y pequeños estudios, normalmente solo las octavas superiores 1, 2 y 4k Hz están bien predichas (en todas las salas, 8k y 16k Hz pueden sufrir la falta de datos de entrada adecuados, pero son necesarias para la auralización natural y se extrapola cuando sea necesario). El diálogo de estimación RT interactivo puede proporcionar información sobre un rango de frecuencia razonable para un modelo de habitación determinada.

A.2 MODELING MODULE

El módulo de modelado es el núcleo de modelado de salas de CATT-Acoustic y maneja todo el modelado y verificación de geometría. El módulo de modelado utiliza archivos de configuración con la extensión .MD9 que almacena toda la información necesaria para el modelado. Se pueden crear diferentes configuraciones de archivos para diferentes propósitos.

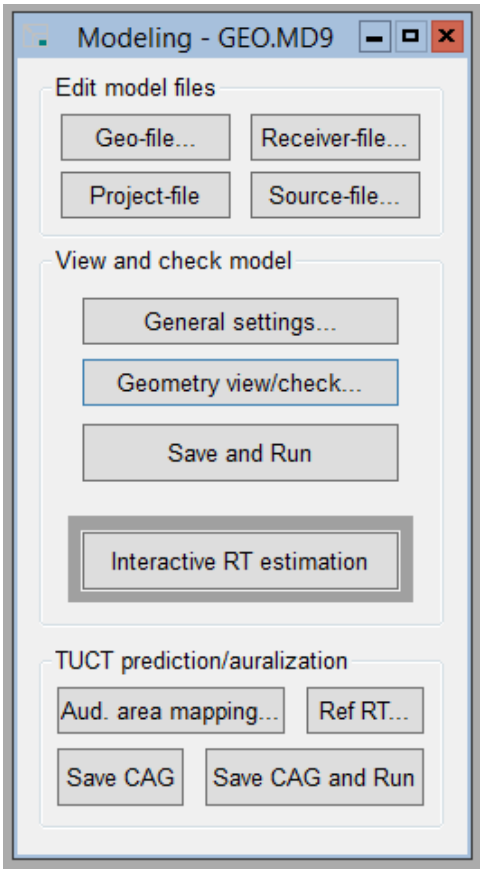


Figura C3. Diálogo principal de modelado.

El diálogo principal de Modelado controla la configuración del proyecto y la vista / comprobación del modelo y tiene una interfaz con *CATT-Edit* para editar archivos de modelo. Cuando se hace clic en Guardar y ejecutar, se guarda el archivo de configuración MD9 actual y el módulo realiza las acciones solicitadas. La estimación interactiva del TR es una función especial que utilizará las opciones de configuración general, pero no afecta al archivo de configuración. Una vez que un modelo está lo suficientemente completo para la predicción (*TUCT prediction / auralization*), *Save CAG and Run* permite a *TUCT* hacerse cargo de la creación de un archivo CAG en la carpeta de salida con un nombre basado en el nombre del proyecto establecido en *General Setting*. [22]

A.2.1 Edit model files

Este módulo nos permitirá abrir y editar los archivos principales, así como las fuentes y los receptores.

A.2.2 General Setting

El cuadro de diálogo de Configuración General controla dónde leer y escribir datos y qué archivos usar, así como otras configuraciones globales, por ejemplo, para la reflexión difusa.

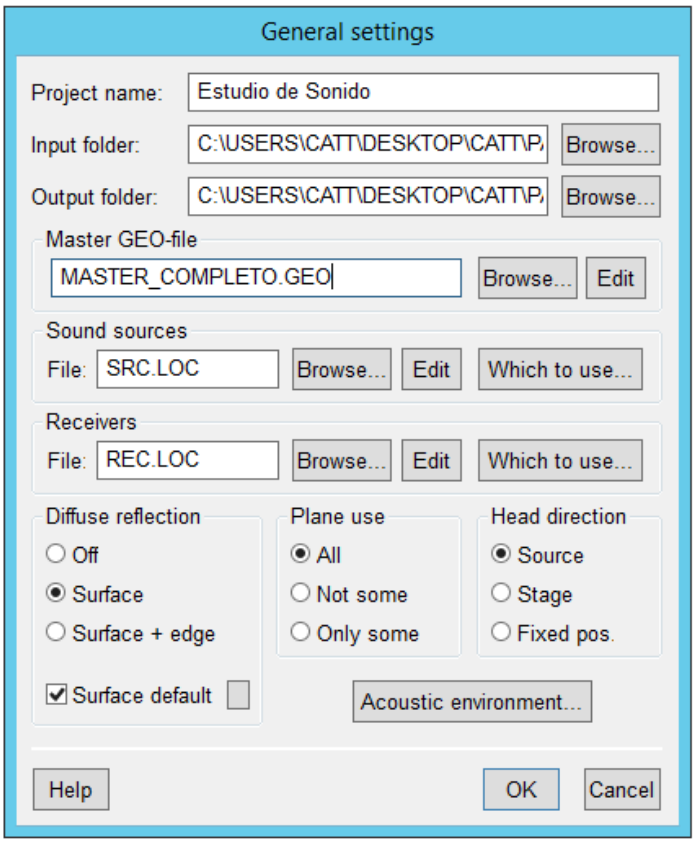


Figura C4. Cuadro de dialogo para la configuración general.

- **Master GEO-file:** Archivo de la geometría y propiedades de las superficies, con "*edit*" se pueden modificar.
- **Sound sources:** Archivo de las fuentes, con *"edit"* se pueden modificar y con *"Which to use"*, decidir cuales de las fuentes definidas en el archivo se van a tener en cuenta en la simulación.
- **Receivers:** Archivo de los receptores, que al igual que en el caso anterior se pueden modificar y decidir cuantos actuaran en la simulación
- **Diffuse reflection:** Se puede decidir en que partes de la sala afectará la reflexión difusa, si en ninguna, en superficies o teniendo en cuenta los ejes de difusión, opción requerida al usar reflectores. Si existen superficies que no tienen definida difusión se le puede asignar una por defecto a todas estas superficies mediante *Surface default.*
- **Acoustic enviroment:** Despliega una ventana para definir las propiedades del aire. Solemos tomar los valores medios de la habitación en estudio.

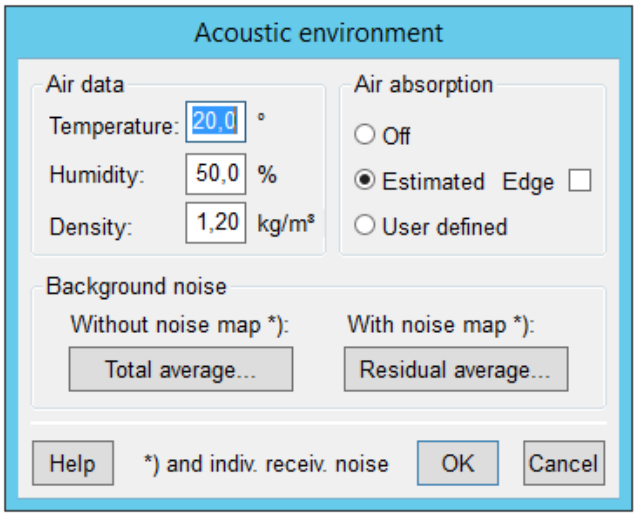


Figura C5. Ventana del acoustic environment.

A.2.3 Geometry view/check

El cuadro de diálogo ver / verificar Geometría controla la configuración para verificar errores de geometría, generación de archivos de trazado y depuración.

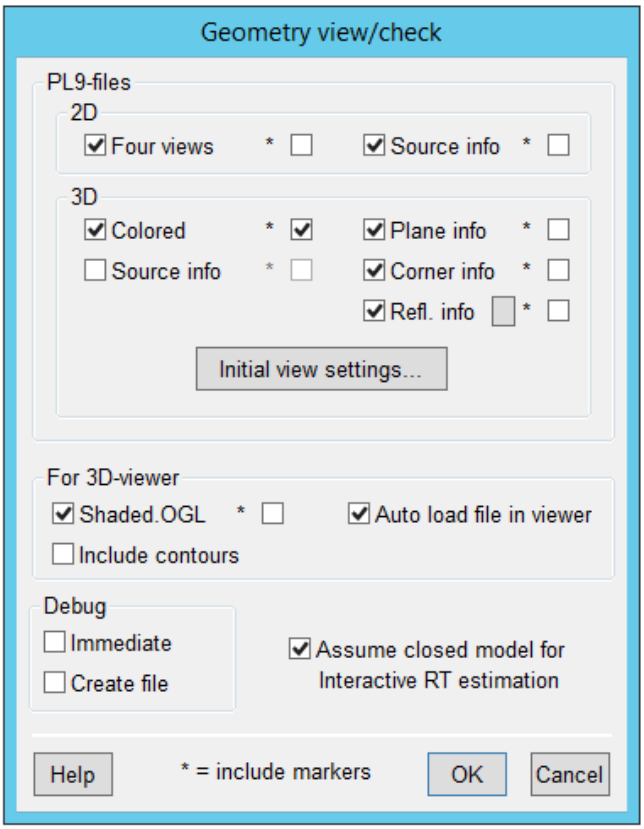


Figura C6. Cuadro de dialogo para la verificación de geometría.

A.2.3 Interactive RT estimation

Para esta función, la geometría se lee de acuerdo con la configuración general de modelado actual y un diálogo donde los valores de Sabine, Eyring RT y Tmf (promedio T-30 para 500 Hz, 1kHz y 2kHz) pueden ser evaluado interactivamente en función de los cambios en las propiedades de la superficie, además puede ser llevado a cabo de un rápido trazado de rayos.

Al cambiar una propiedad asignada a un plano, los TR se recalculan inmediatamente junto con el coeficiente de absorción medio. Si el módulo de propiedades de la superficie está abierto, al hacer doble clic en la lista de propiedades, se cambia automáticamente la propiedad del plano seleccionado en el cuadro de diálogo de estimación de TR interactivo y se actualizan las estimaciones de TR. [22]

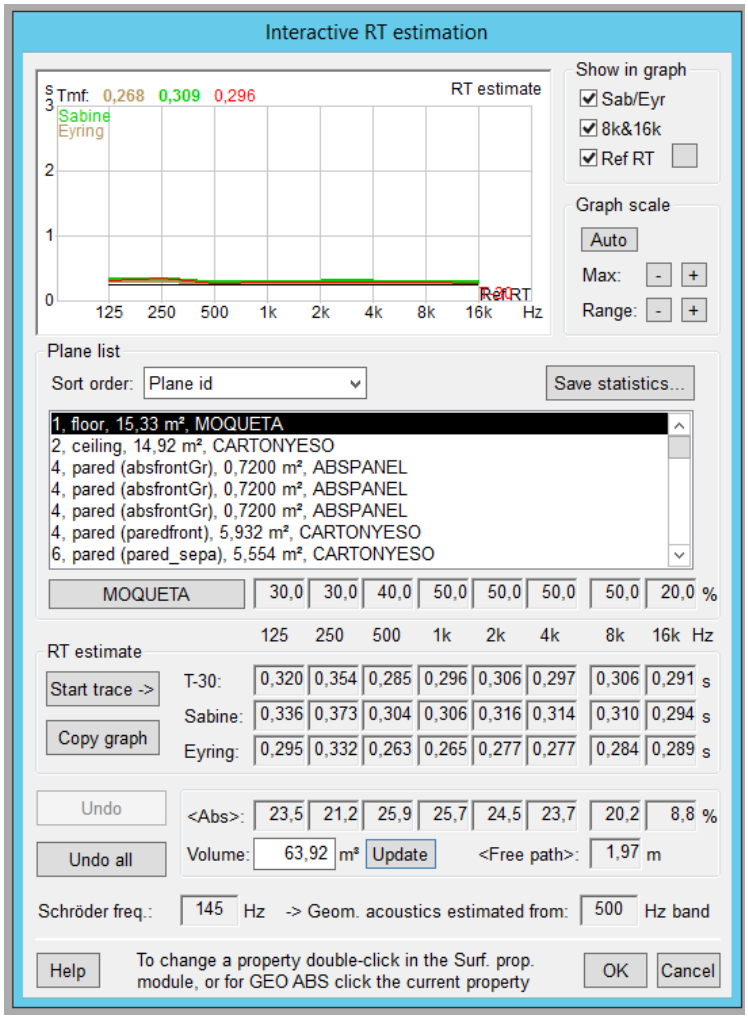


Figura C7. Interactive RT estimation.

Start Trace inicia un trazado de rayos global que actualiza continuamente una estimación global de T-30. Después de 6000 rayos (por banda de octava) el trazado de rayos se detiene automáticamente. El trazado de rayos también se puede detener antes de ese punto presionando STOP trace o cambiando un valor de absorción. [22]

Se pueden guardar las estadísticas, creando un archivo que enumera todas las propiedades de absorción usadas ordenadas según el material más usado junto con sus áreas totales y área de absorción relativa.

```
Settings = C:\Users\catt\Desktop\CATT\Pablo Barrantes Perez (Proyecto)\GEO.MD9
PROJECT  = -
MASTER   = MASTER_COMPLETO.GEO

The absorption is used as follows:
--------------------------------------------------------------------------------
                                          Relative absorption area [%]
Key name        Area [m²] Area [%] <  125  250  500   1k   2k   4k   8k  16k> Used
--------------------------------------------------------------------------------
CARTONYESO          73,7     56,7 < 36,2 21,4 15,3 13,3  9,3  4,8  2,8  6,5>   32
MOQUETA             28,9     22,3 < 28,4 31,5 34,4 43,4 45,4 46,9 55,2 50,8>    2
ABSPANEL            13,4     10,3 < 17,5 19,4 19,9 24,0 25,1 26,0 25,5 23,5>   24
CORTINA              8,8      6,7 <  5,7 12,7 18,2 11,8 12,4 14,2 10,0  7,7>    7
ABSGREUS             2,6      2,0 <  7,8  9,6  7,9  4,8  5,0  5,1  4,0  7,0>    8
ABSCUBO              1,3      1,0 <  3,9  4,8  3,9  2,4  2,5  2,6  2,0  3,5>   16
DIFUSOR              1,3      1,0 <  0,5  0,5  0,4  0,4  0,4  0,4  0,5  1,1>    1
--------------------------------------------------------------------------------
                   130,0

List of planes using each surface property:
--------------------------------------------------------------------------------
ABSCUBO          33-34 38-39 43-44 48-49 65-66 70-71 76-77 81-82
ABSGREUS         35 40 45 50 67 72 78 83
ABSPANEL         4 10 12 14 20 24 53-54
CARTONYESO       2 4 6-8 10 12 14 17 20 24 27-31 36-37 41-42 46-47 51-52 68-69 73-74 79-80 84-85
CORTINA          6 8 21 24-26 32
DIFUSOR          14
MOQUETA          1 22
--------------------------------------------------------------------------------
```

Figura C8. Estadísticas de los materiales.

Para ayudar a estimar desde qué banda puede ser válida la acústica geométrica, se calcula la frecuencia de corte o frecuencia de Schröder mediante la siguiente cuación:

$$fc = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \qquad \text{(A1)}$$

Donde T se toma como el promedio del TR y V es el volumen de la sala

A.2.4 TUCT prediction/auralization

Cuando la geometría está completa y se comprueba si hay errores, y las propiedades reales de la superficie asignados, se pueden realizar predicciones completas y auralizaciones a través de TUCT.

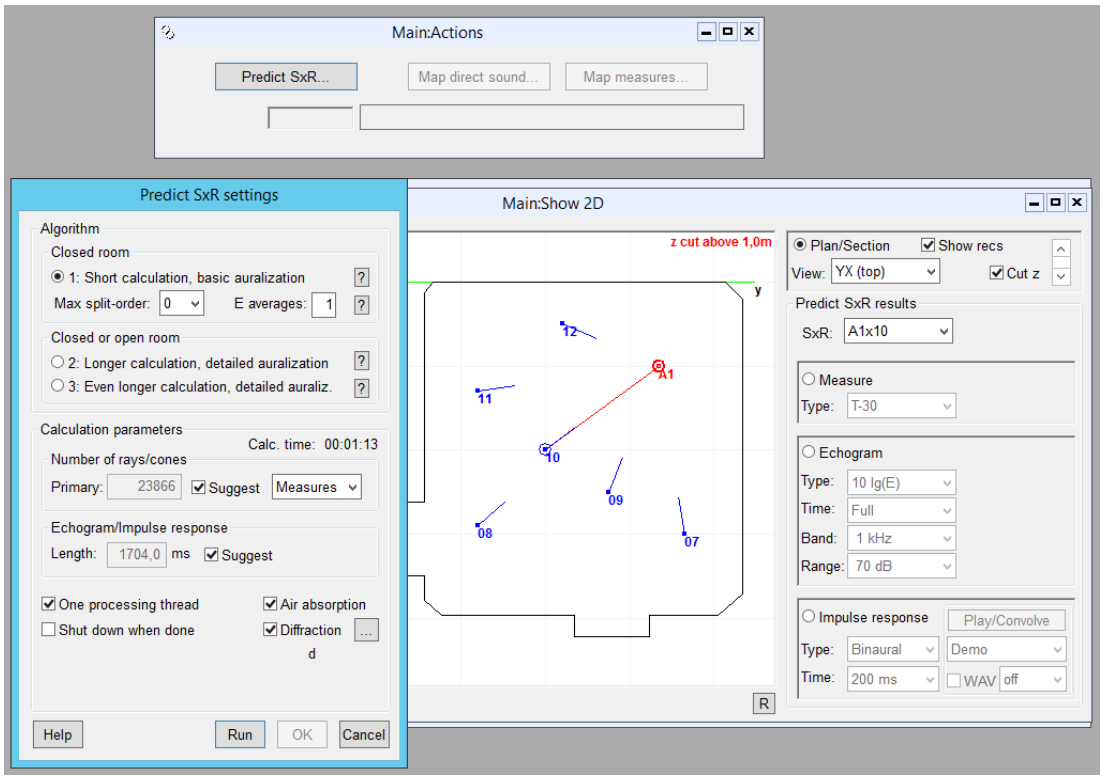


Figura C9. Ventana de configuración y simulalación para predicción.

El diálogo "*Principal: Acciones*" es el centro de control para ejecutar las predicciones principales, proporciona entradas para cada método de predicción

principal y muestra las actividades en curso para todos los cálculos relacionados con los métodos de predicción principales y sus resultados

Se abre el cuadro de diálogo *Predict SxR* para iniciar una nueva predicción para todas las fuentes definidas y receptores, o para revisar la configuración utilizada con una predicción previa.

En la configuración de predicción, los botones "**?**" muestran información básica sobre cada uno de los algoritmos.

Hay tres tipos de algoritmos para el cálculo de los parámetros acústicos:

1. Cálculo corto, auralización básica (habitación cerrada). Debido al uso de la reflexión difusa aleatoria, se ocultarán los ecos de aleteo tardío.
2. Calculo más largo, auralización detallada (habitación cerrada o abierta).
3. Cálculo aún más largo, auralización detallada. (habitación cerrada o abierta).

Información común a los tres algoritmos:

- El sonido directo y el de 1er orden especular se manejan sin rayos.
- La reflexión difusa depende de la frecuencia, traza rayos individuales para cada banda de octava.

La reflexión difusa de primer orden se maneja con la división de rayos real. El algoritmo 1 tiene una opción para usar la primera orden más simple que se divide para cálculos iniciales más rápidos, se usa el orden de división máximo = 0. [22]

Las opciones para el *cálculo de parámetros* dependen del algoritmo seleccionado, pero todos requieren la elección del número de rayos / conos y longitudes para la respuesta de ecogramas / impulsos.

Para la elección del número de rayos, el programa te recomienda según el tipo de medida a realizar, dependiendo de las dimensiones de la sala.

Measures: Un número suficiente para la predicción de medidas, pero puede dar una densidad de reflexión demasiado baja para obtener una buena auralización.

Auralización: Un número más adecuado para usar con buena auralización y crea una densidad de reflexión suficiente. En una habitación pequeña este número puede ser el mismo que para la opción recomendada *"measure"*.

Para terminar la configuración de predicción mediante TUCT, destacar las opciones para activar o desactivar la absorción del aire y la difracción del sonido. Esta última permite abrir un cuadro de dialogo para modificar sus parámetros, y así elegir el tipo de difracción en la sala.

El menú ***Window*** ofrece funciones especiales adicionales de predicción, procesamiento y formas de organizar/seleccionar ventanas actualmente abiertas.

- ***Main: Impulse Response Detail***. Esta ventana muestra los resultados de cálculo actuales de la respuesta al impulso con respuesta de frecuencia, es decir, la magnitud de la función de transferencia y espectrograma.

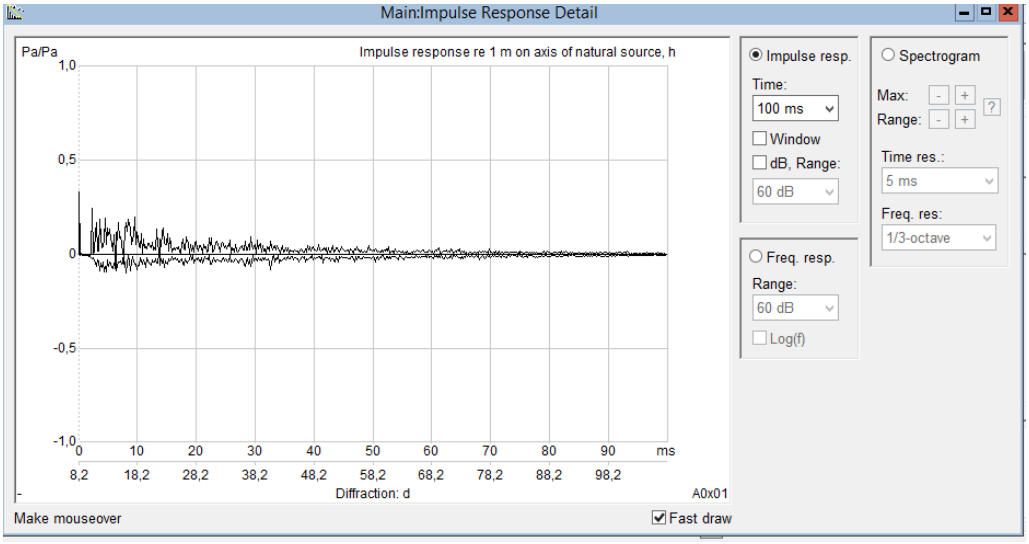


Figura C10. Detalles de la respuesta al impulso en frecuencia.

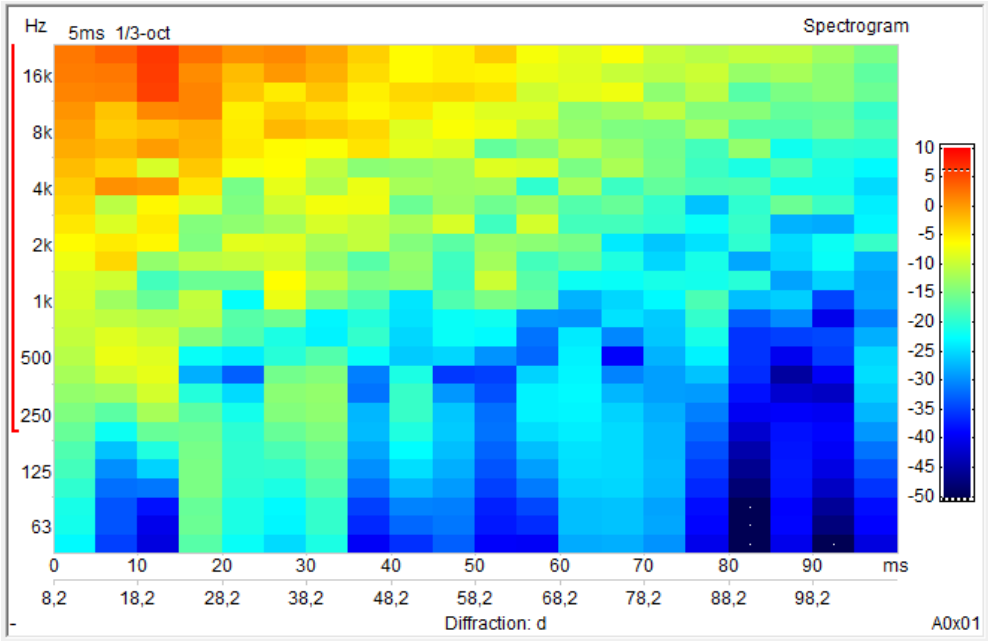


Figura C11. Detalles de la respuesta al impulso en espectograma.

- ***Pixel Rendering.*** Abre una ventana de renderizado de píxeles. La reproducción directa del sonido es, en principio, la misma que crea la opción de *Main: Actions Map direct*, pero la asignación se puede hacer directamente en todas las superficies visibles desde el punto de vista y, dado

que solo se rastrea el sonido directo y no se crean resultados de gráficos vectoriales, se puede implementado de manera diferente. [22]

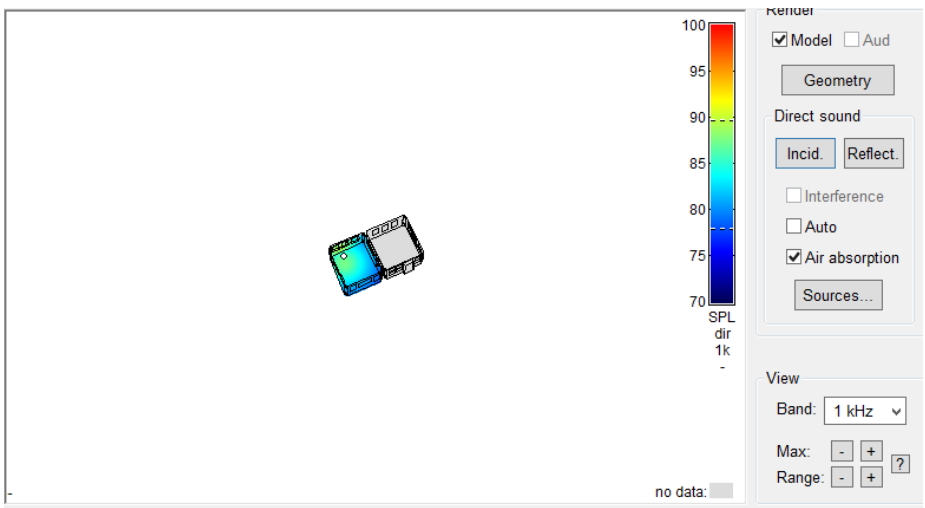


Figura C12. Detalles del renderizado de pixeles.

- ***Surface Rendering.*** Abre una ventana de renderizado de superficie similar a la representación de píxeles, pero también representa aquellas superficies que no son visibles en la vista 3D inicial, ya que lo hace a una resolución de parche de superficie seleccionada absoluta que permite la rotación del modelo después de completar la representación. [22]

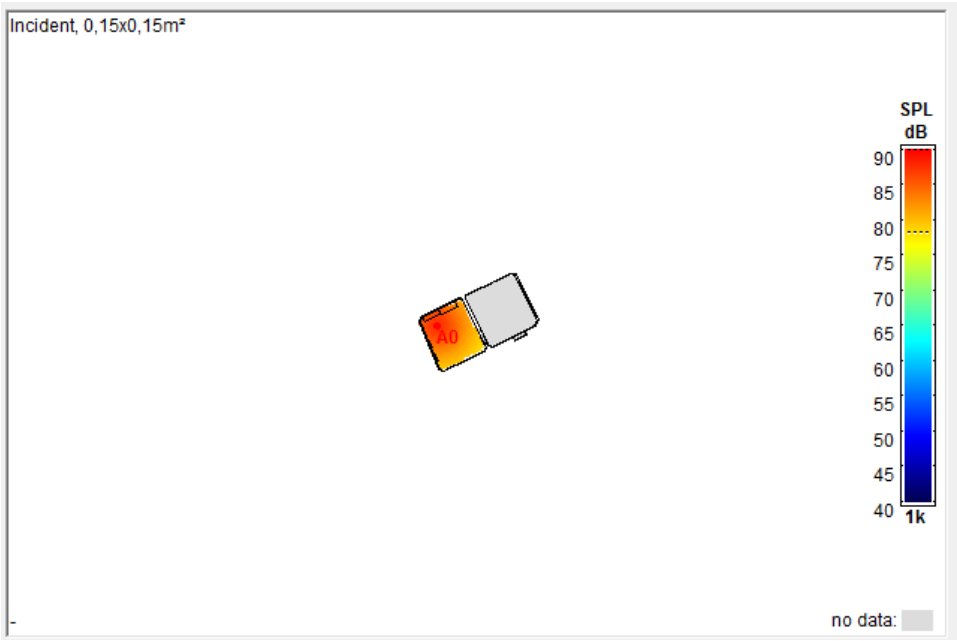


Figura C13. Detalles del rendenderizado de superficies.

- ***Vertical Slice Rendering:*** El renderizado vertical del segmento es similar al renderizado de superficie, pero solo muestra una división vertical seleccionada en la sala y solo reproduce el sonido incidente (ya que la división es una superficie virtual) y colorea la división en ambos lados. La representación de corte vertical permite girar el corte vertical en pasos de 1 ° y al hacer clic en "pos" mueve el corte vertical en pasos de 0,1 m. [22]

- ***Image Source Model:*** Este cálculo ISM trata la dispersión y la semitransparencia como un factor adicional. La absorción deja solo la energía especular para afectar las fuerzas de reflexión del ecograma. Es diseñado para el análisis cualitativo donde las reflexiones específicas solo pueden ser útiles para detectar ecos o problemas de retraso de la fuente. [22]

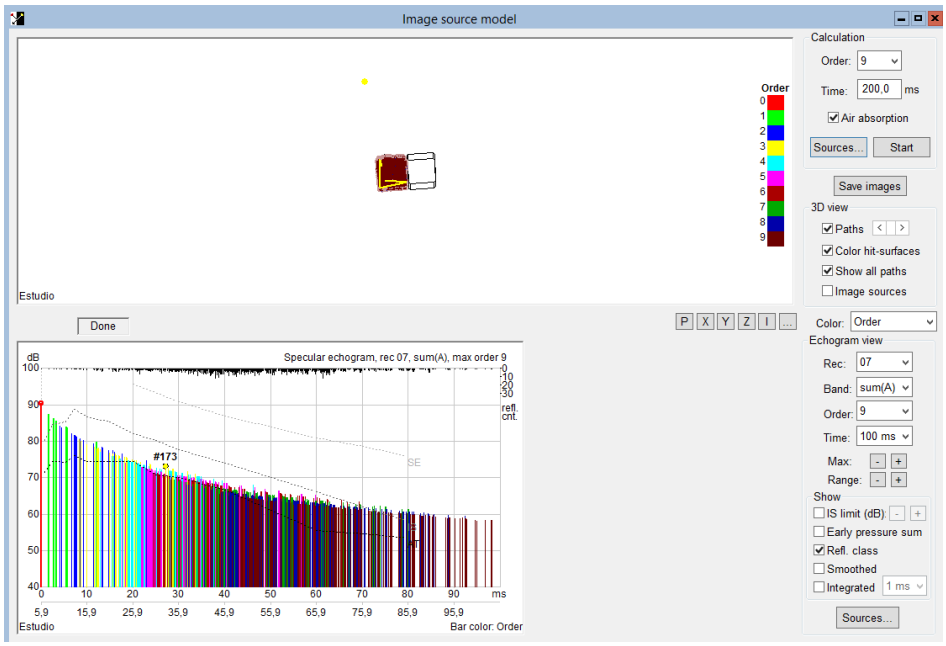


Figura C14. Detalles de las reflexiones mediante el modelo de imagenes.

- ***Time Trace:*** Destinado para el análisis cualitativo donde, las reflexiones especulares pueden ser útiles para detectar problemas como el enfoque o el eco de aleteo. Las trazas se hacen desde cada elemento de la matriz usando la división del número de rayos por el número de elementos de la matriz. Los segmentos de rayo pueden colorearse según el SPL, Orden de reflexión o Fuente. El uso típico es verificar la cobertura del reflector. Los conjuntos pueden ser guardados y cargados.

ANEXO D: MATERIALES PARA PROPUESTA DE MEJORA

D.1 PANEL ABSORBENTE

Los paneles absorbentes estarán destinados a aumentar el confort acústico en las salas. A continuación, se detallan las características del tipo de panel absorbente elegido.

El material absorbente está compuesto de fibra de poliéster con utilidad absorbente a medias y altas frecuencias, diseñado con tejido acústico de tela clase 1. La absorción a 250 Hz es del 80% y a 500 Hz del 100%. Clase A de absorción acústica según dicta la normativa ISO 11654.

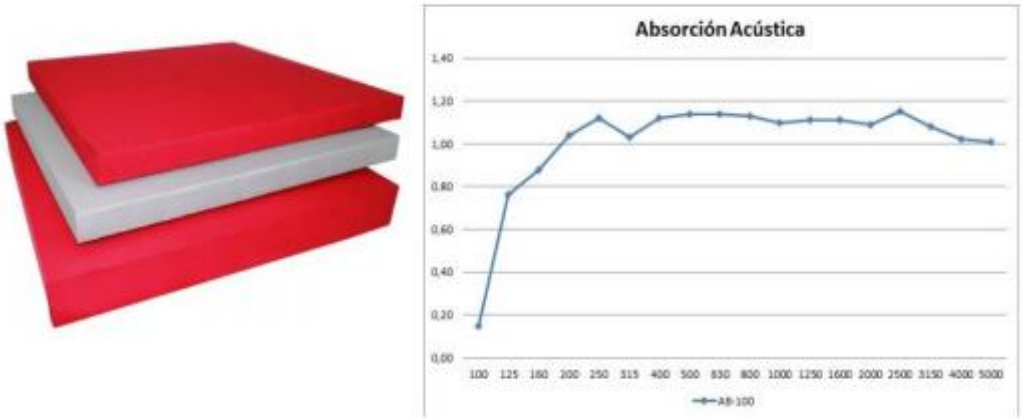


Figura D1. Gráfica del coeficiente de absorción acústica de los paneles absorbentes. [12]

D.2 TRAMPA DE GRAVES. FOAM CUB

Las trampas de graves se utilizan para atacar las bajas frecuencias, su forma de cubo es idónea para instalar en las equinas superiores o inferiores de las salas, en la zona donde más nodos de resonancia existen. Ideal para combinar con *Greus Tramp*.

Material de espuma acústica compuesto de poliuretano flexible de celda abierta con densidad de 25 kg/m^3 (ISO 845) y clase A de absorción acústica ISO 11654.

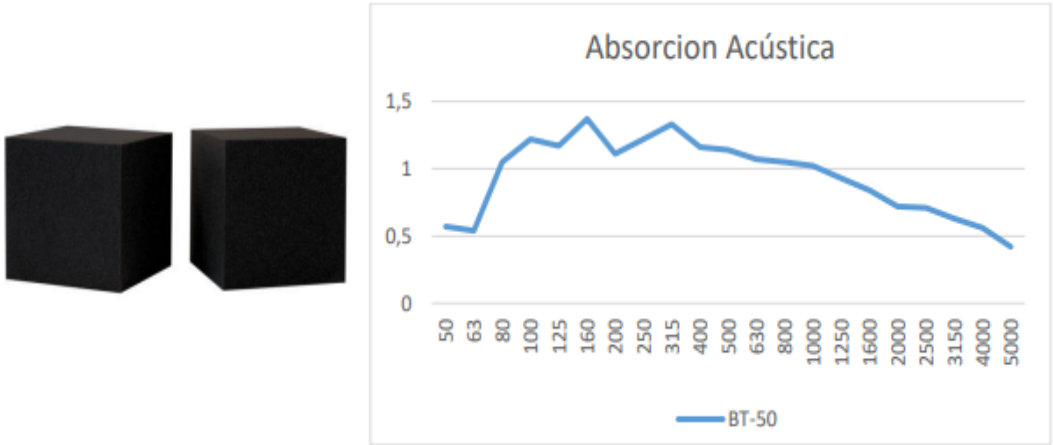


Figura D2. Gráfica del coeficiente de absorción acústica de las trampas de graves (cubo). [12]

D.3 TRAMPA DE GRAVES. FOAM GREUS

Las trampas de espuma greus destinadas para absorción de sonido a bajas frecuencias están diseñadas para ser encajadas en esquinas y complementar a los cubos acústicos.

Material de espuma acústica compuesto de poliuretano flexible de celda abierta, densidad 25 kg/m^3. Aplicadas a salas de ensayo, salas de grabación, cabinas de voz, locutorios, salas de doblaje, control room, etc.

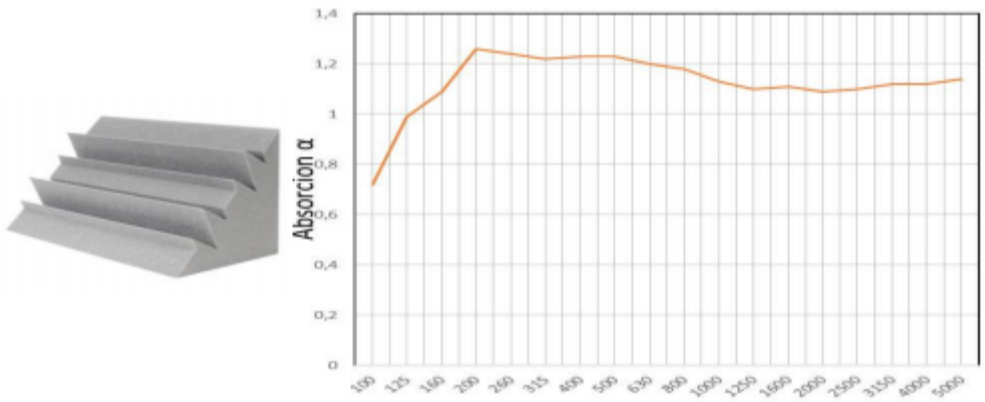


Figura D3. Gráfica del coeficiente de absorción acústica de la trampa de graves (greus). [12]

D.4 CORTINA ACÚSTICA

Las cortinas acústicas están compuestas de una tela ignifuga de algodón de 500g/m^2. Ideal para la alta absorción de sonido y reducción del tiempo de reverberación, tanto en estudios como en habitaciones expuestas a una alta presión de sonido.

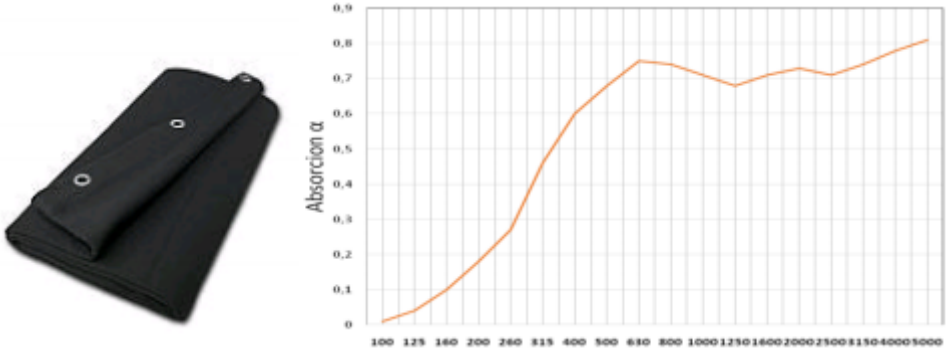


Figura D4. Gráfica del coeficiente de absorción de cortinas acústicas. [12]

Absorción acústica de clase C con aplicación del tratamiento de acondicionamiento acústico, control de reverberación, reflexiones primarias, reducción de eco flotante y absorción localizada en salas de control, salas de grabación, estudios de radio, etc.

ANEXO E: DATOS GEOMÉTRICOS DE LA SIMULACIÓN

E.1 GEOMETRÍA

```
;MASTER_completo.GEO

;PROJECT=Estudio

;INCLUDE

;OFFSETCO

;OFFSETPL

;MIRROR co_add pl_add

;ABS absname <10 10 10 10 10 10> L< 30 30 30 30 30 30>

ABS cartonyeso <  25   25     14     12    8     4  ; 2  2   >  L <10 10 10 10 10 10>{ 255 255 255 }

ABS     tarima <  8    10    18    18    5     5 ; 2 2  > L <10 10 10 10 10 10> { 173 127 48  }

ABS    ventana <  35    35    20    15    10    5 ; 3 3   >  L <10 10 10 10 10 10>{ 96  107 236 }

ABS    puertas <  15    10     5    10     10      5 ;  2 2   > L <10 10 10 10 10 10> { 95  95  95  }

ABS abspanel < 40 40 50 60 60 60 : 50 20  > { 0 0 0 }

ABS absCUBO < 90 100  100  60 60  60 : 40 30  > { 0 0 0 }

ABS absGreus < 90 100  100  60 60  60 : 40 30  > { 101 102 117 }

ABS moqueta < 3 7 17 24 40 40 : 50 30> { 62 60 57 }

ABS difusor <12 10 10 10 10 10> L <30 40 50 60 70 80 > { 215 186 0 }

ABS cortina < 20 40 70 45 45  50 : 30 10  >  {113 27 27}
```

```
CORNERS
;id x y z
;floor corners
1  0.200   7.342  0
2    0     7.136  0
3    0     3.663  0
4   0.13   3.563  0
5  2.615   3.563  0
6  2.615   3.348  0
7   0.13   3.348  0
8    0     3.198  0
9    0     0.228  0
10  0.231    0    0
11  3.739  -0.190  0
12  3.970  0.038  0
13  3.970  3.198  0
14  3.790  3.348  0
15  3.499  3.348  0
16  3.499  3.563  0
17  3.790  3.563  0
18  3.970  3.768  0
19  3.970  5.342  0
20  3.970  6.23  0
21  3.970  7.042  0
22  3.710  7.342  0
45  4.220  5.342  0
46  4.220  6.23   0
;ceiling corners
```

23 0.200 7.342 2.330

24 0 7.136 2.330

25 0 3.663 2.330

26 0.13 3.563 2.330

27 2.615 3.563 2.330

28 2.615 3.348 2.330

29 0.13 3.348 2.330

30 0 3.198 2.330

31 0 0.228 2.330

32 0.231 0 2.330

33 3.739 -0.190 2.330

34 3.970 0.038 2.330

35 3.970 3.198 2.330

36 3.790 3.348 2.330

37 3.499 3.348 2.330

38 3.499 3.563 2.330

39 3.790 3.563 2.330

40 3.970 3.768 2.330

41 3.970 5.342 2.040

47 4.220 5.342 2.040

48 4.220 6.23 2.040

42 3.970 6.23 2.040

43 3.970 7.042 2.330

44 3.710 7.342 2.330

49 2.615 3.348 2.040

50 3.499 3.348 2.040

51 2.615 3.563 2.040

52 3.499 3.563 2.040

53 1.5225 7.342 1.99

54 2.3875 7.342 1.99

55 1.5225 7.342 1.410

56 2.3875 7.342 1.410

57 2.07 3.563 1.98

58 0.77 3.563 1.98

59 0.77 3.563 1.08

60 2.07 3.563 1.08

61 0.77 3.348 1.98

62 0.77 3.348 1.08

63 2.07 3.348 1.98

64 2.07 3.348 1.08

;Esquina Contrl 1

65 0.13 3.348 2.030

66 0 3.198 2.030

67 0.13 3.348 0.300

68 0 3.198 0.300

69 0.13 3.348 1.765

70 0 3.198 1.765

71 0.13 3.348 0.565

72 0 3.198 0.565

;Esquina Control 2

73 0 0.228 0.300

74 0.231 0 0.300

75 0 0.228 2.030

76 0.231 0 2.030

77 0 0.228 0.565

78 0.231 0 0.565

79 0 0.228 1.765

80 0.231 0 1.765

;Esquina Control 3

81 3.739 -0.190 0.300

82 3.970 0.038 0.300

83 3.739 -0.190 2.030

84 3.970 0.038 2.030

85 3.739 -0.190 0.565

86 3.970 0.038 0.565

87 3.739 -0.190 1.765

88 3.970 0.038 1.765

;Esquina Control 3

89 3.970 3.198 0.300

90 3.790 3.348 0.300

91 3.970 3.198 2.030

92 3.790 3.348 2.030

93 3.970 3.198 0.565

94 3.790 3.348 0.565

95 3.970 3.198 1.765

96 3.790 3.348 1.765

;ABSpanel ParedFrontal Control

97 0 1 0.8

98 0 0.4 0.8

99 0 1 2

100 0 0.4 2

101 0 1.9 0.8

102 0 1.3 0.8

103 0 1.9 2

104 0 1.3 2

105 0 2.8 0.8

106 0 2.2 0.8

107 0 2.8 2

108 0 2.2 2

;ABSpanel ParedLateral Control

109 0.6 0 0.8

110 0.6 0 2

111 1.2 0 2

112 1.2 0 0.8

113 1.6 0 0.8

114 1.6 0 2

115 2.2 0 2

116 2.2 0 0.8

117 2.6 0 0.8

118 2.6 0 2

119 3.2 0 2

120 3.2 0 0.8

;ABSpanel ParedTrasera Control

121 3.970 0.230 0.8

122 3.970 0.230 2

123 3.970 0.830 2

124 3.970 0.830 0.8

125 3.970 1 0.9

126 3.970 1 1.9

127 3.970 2.260 1.9

128 3.970 2.260 0.9

129 3.970 2.430 0.8

130 3.970 2.430 2

131 3.970 3.030 2

132 3.970 3.030 0.8

;ABSpanel ParedTecho Control

133 0 1.55 2.05

134 0.4 1.55 2.330

135 0.4 0.35 2.330

136 0 0.35 2.05

137 0 1.65 2.05

138 0.4 1.65 2.330

139 0.4 2.85 2.330

140 0 2.85 2.05

;Esquina Grab 1

141 0.200 7.342 0.300

142 0 7.136 0.300

143 0.20 7.342 2.030

144 0 7.136 2.030

145 0.20 7.342 0.565

146 0 7.136 0.565

147 0.20 7.342 1.765

148 0 7.136 1.765

;Esquina Grab 2

149 0 3.663 0.300

150 0.13 3.563 0.300

151 0 3.663 2.030

152 0.13 3.563 2.030

153 0 3.663 0.565

154 0.13 3.563 0.565

155 0 3.663 1.765

156 0.13 3.563 1.765

;Esquina Grab 3

157 3.790 3.563 0.300

158 3.970 3.768 0.300

159 3.790 3.563 2.030

160 3.970 3.768 2.030

161 3.790 3.563 0.565

162 3.970 3.768 0.565

163 3.790 3.563 1.765

164 3.970 3.768 1.765

;Esquina Grab 4

165 3.970 7.042 0.300

166 3.710 7.342 0.300

167 3.970 7.042 2.030

168 3.710 7.342 2.030

169 3.970 7.042 0.565

170 3.710 7.342 0.565

171 3.970 7.042 1.765

172 3.710 7.342 1.765

;Absorbentes Pared trasera Grabacion

173 3.970 6.39 0.6

174 3.970 6.939 0.6

175 3.970 6.39 1.2

176 3.970 6.939 1.2

177 3.970 6.39 1.4

178 3.970 6.939 1.4

179 3.970 6.39 2

180 3.970 6.939 2

181 3.970 3.905 0.6

182 3.970 4.505 0.6

183 3.970 3.905 1.2

184 3.970 4.505 1.2

185 3.970 4.605 0.6

186 3.970 5.205 0.6

187 3.970 4.605 1.2

188 3.970 5.205 1.2

189 3.970 3.905 1.4

190 3.970 4.505 1.4

191 3.970 3.905 2

192 3.970 4.505 2

193 3.970 4.605 1.4

194 3.970 5.205 1.4

195 3.970 4.605 2

196 3.970 5.205 2

;ABSpanel ParedLateralFachada Grabacion

197 0.6625 7.342 0.6

198 1.2625 7.342 0.6

199 0.6635 7.342 1.2

200 1.2625 7.342 1.2

201 1.41 7.342 0.6

202 2.61 7.342 0.6

203 1.41 7.342 1.2

204 2.61 7.342 1.2

205 0.6625 7.342 1.4

206 1.2625 7.342 1.4

207 0.6625 7.342 2

208 1.2625 7.342 2

209 2.75 7.342 0.6

210 3.35 7.342 0.6

211 2.75 7.342 1.2

212 3.35 7.342 1.2

213 2.75 7.342 1.4

214 3.35 7.342 1.4

215 2.75 7.342 2

216 3.35 7.342 2

;ABSpanel ParedFrontal Grabacion

217 0 4.2 0.6

218 0 4.8 0.6

219 0 4.8 1.8

220 0 4.2 1.8

221 0 5.1 0.6

222 0 5.7 0.6

223 0 5.7 1.8

224 0 5.1 1.8

225 0 6 0.6

226 0 6.6 0.6

227 0 6.6 1.8

228 0 6 1.8

PLANES

[1 floor / 1 2 3 4 5 6 15 16 17 18 19 45 46 20 21 22 / moqueta]

[22 floor / 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 / moqueta]

[2 ceiling / 44 43 40 39 26 25 24 23 / cartonyeso]

[31 ceiling / 36 35 34 33 32 31 30 29 / cartonyeso]

[65 CUBO9 / 1 141 142 2 / absCUBO]

[66 CUBO10 / 143 23 24 144 / absCUBO]

[67 Greus5 / 145 147 148 146 / absGreus]

[68 paredesquinagrab1 / 141 145 146 142 / cartonyeso]

[69 paredesquinagrab2 / 147 143 144 148 / cartonyeso]

[70 CUBO11 / 3 149 150 4 / absCUBO]

[71 CUBO12 / 25 26 152 151 / absCUBO]

[72 Greus6 / 153 155 156 154 / absGreus]

[73 paredesquinagrab3 / 149 153 154 150 / cartonyeso]

[74 paredesquinagrab4 / 155 151 152 156 / cartonyeso]

[4 pared / 2 24 25 3 /

(absfrontGrab1 / 217 218 219 220 / abspanel)

(absfrontGrab2 / 221 222 223 224 / abspanel)

(absfrontGrab3 / 225 226 227 228 / abspanel)

(paredfrontalGrab / 2 24 25 3 / cartonyeso)]

[6 pared / 4 26 39 17 16 52 51 5 /

(ventana_grabacion / 59 58 57 60 / cortina)

(pared_separadora1 / 4 26 39 17 16 52 51 5 / cartonyeso)]

[7 pared / 5 51 49 6 / cartonyeso]

[8 pared / 14 36 29 7 6 49 50 15 /

(ventana_control / 64 63 61 62 / cortina)

(pared_separadora2 / 14 36 29 7 6 49 50 15 /cartonyeso)]

[33 CUBO1 / 65 29 30 66 / absCUBO]

[34 CUBO2 / 7 67 68 8 / absCUBO]

[35 Greus1 / 69 70 72 71 / absGreus]

[36 paredesquinacontrol1 / 67 71 72 68 / cartonyeso]

[37 paredesquinacontrol2 / 69 65 66 70 / cartonyeso]

[38 CUBO3 / 9 73 74 10 / absCUBO]

[39 CUBO4 / 75 31 32 76 / absCUBO]

[40 Greus2 / 77 79 80 78 / absGreus]

[41 paredesquinacontrol3 / 73 77 78 74 / cartonyeso]

[42 paredesquinacontrol4 / 79 75 76 80 / cartonyeso]

[10 paredFrontalControl / 8 30 31 9 /

(absfront1 / 97 99 100 98 / abspanel)

(absfront2 / 101 103 104 102/ abspanel)

(absfront3 / 105 107 108 106/ abspanel)

(paredfrontal / 8 30 31 9 / cartonyeso)]

[12 paredLateralControl / 10 32 33 11 /

(abslat1 / 112 111 110 109 / abspanel)

(abslat2 / 116 115 114 113 / abspanel)

(abslat3 / 120 119 118 117/ abspanel)

(paredlateral / 10 32 33 11 / cartonyeso)]

[43 CUBO5 / 11 81 82 12 / absCUBO]

[44 CUBO6 / 83 33 34 84 / absCUBO]

[45 Greus3 / 85 87 88 86 / absGreus]

[46 paredesquinacontrol5 / 81 85 86 82 / cartonyeso]

[47 paredesquinacontrol6 / 87 83 84 88 / cartonyeso]

[14 pared / 12 34 35 13 /

(abstras1 / 121 124 123 122 / abspanel)

(abstras2 / 125 128 127 126 / difusor)

(abstras3 / 129 132 131 130/ abspanel)

(paredtrasera / 12 34 35 13 / cartonyeso)]

[48 CUBO7 / 13 89 90 14 / absCUBO]

[49 CUBO8 / 91 35 36 92 / absCUBO]

[50 Greus4 / 93 95 96 94 / absGreus]

[51 paredesquinacontrol7 / 89 93 94 90 / cartonyeso]

[52 paredesquinacontrol8 / 95 91 92 96 / cartonyeso]

[17 pared / 15 50 52 16 / cartonyeso]

[76 CUBO13 / 157 158 18 17 / absCUBO]

[77 CUBO14 / 39 40 160 159 / absCUBO]

[78 Greus7 / 163 164 162 161 / absGreus]

[79 paredesquinagrab5 / 162 158 157 161 / cartonyeso]

[80 paredesquinagrab6 / 159 160 164 163/ cartonyeso]

[20 pared / 18 40 43 21 20 42 41 19 /

(abstrasero1 / 173 175 176 174 / abspanel)

(abstrasero2 / 177 179 180 178 / abspanel)

(abstrasero3 / 181 183 184 182 / abspanel)

(abstrasero4 / 185 187 188 186 / abspanel)

(abstrasero5 / 189 191 192 190 / abspanel)

(abstrasero6 / 193 195 196 194 / abspanel)

(paredtrasera / 18 40 43 21 20 42 41 19 / cartonyeso)]

[21 puertaprincipal / 45 47 48 46 / cortina]

[81 CUBO15 / 22 21 165 166 / absCUBO]

[82 CUBO16 / 168 167 43 44 / absCUBO]

[83 Greus8 / 169 171 172 170 / absGreus]

[84 paredesquinagrab7 / 165 169 170 166 / cartonyeso]

[85 paredesquinagrab8 / 171 167 168 172 / cartonyeso]

[24 pared / 22 44 23 1 /

(ventana_fachada / 56 54 53 55 / cortina)

(absfachada1 / 197 198 200 199 / abspanel)

(absfachada2 / 201 202 204 203 / abspanel)

(absfachada3 / 205 206 208 207 / abspanel)

(absfachada4 / 209 210 212 211 / abspanel)

(absfachada5 / 213 214 216 215 / abspanel)

(pared_fachada / 22 44 23 1 / cartonyeso)]

[25 puertaseparacion1 / 6 49 50 15 / cortina]

[26 puertaseparacion2 / 15 50 49 6 / cortina]

[27 pared / 47 45 19 41 / cartonyeso]

[28 pared / 46 48 42 20 / cartonyeso]

[29 techopuertaprcpal / 42 48 47 41 / cartonyeso]

[30 techopuertaseparacion / 49 51 52 50 / cartonyeso]

[32 ventanafachada / 56 54 53 55 / cortina]

[53 absTecho1 / 133 134 135 136 / abspanel]

[54 absTecho2 / 140 139 138 137 / abspanel]

E.2 RECEPTORES

```
;PROJECT=Estudio

;REC.LOC

RECEIVERS


;Micros controL

1  3.270 2.648 1.15

2  2.970   0.8  1.15

3  2.570   1.948  1.15

4      1.9  1.3  1.15

5   1.5  2.3 1.15

6    0.5   2.448 1.15


;Micros grabación

7  3 6.648 1.15

8  2.9   4.2   1.15

9  2.5   5.748  1.15

10      2  5  1.15

11   1.3  4.2 1.15

12    0.5   5.2 1.15
```

E.3 FUENTES

```
;PROJECT=Estudio

;natural source
SOURCE A0

 DIRECTIVITY = "omni"
 POS = 1 1 1.3
 ;AIMPOS = 0.0 3.0 1.7
 AIMANGLES = 90 0
 Lp1m_a =  <89.95          95.20     92.71     89.8      91.05     84.29>
;speech input
END

;natural source
SOURCE A1

 DIRECTIVITY = "omni"
 POS = 1 6.342 1.3
 ;AIMPOS = 0.0 3.0 1.7
```

```
 AIMANGLES = 90 0

 Lp1m_a =  <89.95          95.20     92.71     89.8       91.05     84.29>

;speech input

END
```