

**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y  
ELECTRÓNICA**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

*Estudio acústico del piano.*

**TITULACIÓN:** Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones, Sonido e Imagen

**AUTORA:** Cristina Quintana Quintana

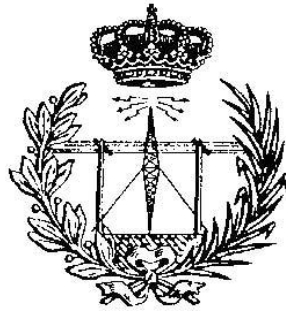
**TUTOR:** Manuel Medina Molina

**FECHA:** Junio 2015



**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y  
ELECTRÓNICA**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

*Estudio acústico del piano.*

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Tutor:

Autora:

**NOTA:**

**TITULACIÓN:** Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones, Sonido e Imagen

**AUTORA:** Cristina Quintana Quintana

**TUTOR:** Manuel Medina Molina

**FECHA:** Junio de 2015



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutor Manuel Medina Molina por su inestimable ayuda en la realización del presente Proyecto Fin de Carrera.

Al Equipo Directivo del Conservatorio Profesional de Música de Las Palmas de Gran Canaria y del Conservatorio Superior de Música de Canarias (sede de Gran Canaria) por las facilidades ofrecidas para la ocupación de su Auditorio con objeto de la realización de las medidas acústicas del recinto así como la grabación de las muestras sonoras del piano de cola.

A mi amiga Gema Santiago Martín por haber sido una magnífica compañera de batallas en la elaboración conjunta de la caracterización acústica del Auditorio.

A mi familia y amigos por todo el apoyo brindado a lo largo de estos años de estudio. A mi primo Luisi por sus sabios consejos.

Y en definitiva, a todos aquellos que de una manera u otra han contribuido a hacer posible esto.



# ÍNDICE

---

<b>MEMORIA</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Objetivos del Proyecto	3
1.2. Antecedentes en el tema de investigación	4
1.3. Estructura del Proyecto	5
<b>Capítulo 2: Diseño y desarrollo</b>	<b>7</b>
<b>PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA</b>	
<b>2.1. El Auditorio del CPMLPGC/CSMC</b>	<b>7</b>
2.1.1. Emplazamiento	7
2.1.2. Características de la sala	9
2.1.3. Situación de las posiciones de medida	10
2.1.4. Situación de la fuente sonora	12
<b>2.2. Medición de la respuesta impulsiva de la sala</b>	<b>13</b>
2.2.1. Equipamiento necesario	13
2.2.2. <i>Software</i> empleado: DIRAC 3.0	15
2.2.2.1. Descripción	15
2.2.2.2. Entorno del programa	16
2.2.2.2.1. Barra de herramientas	16
2.2.2.2.2. Visualización de parámetros	19
2.2.3. Modos de medida utilizados	21
2.2.3.1. MLS Interno	21
2.2.3.1.1. Configuración	21
2.2.3.1.2. Conexionado	22
2.2.3.1.3. Desarrollo de la medida	23
2.2.3.2. MLS Externo	23
2.2.3.2.1. Configuración	23

2.2.3.2.2. Conexionado	24
2.2.3.2.3. Desarrollo de la medida	25
2.2.3.3. Impulso Externo	25
2.2.3.3.1. Configuración	25
2.2.3.3.2. Conexionado	26
2.2.3.3.3. Desarrollo de la medida	27
<b>2.3. Simulación acústica</b>	<b>28</b>
<b>2.3.1. Software empleado: EASE</b>	<b>28</b>
2.3.1.1. Descripción	28
2.3.1.2. Entorno del EASE 2.1	29
2.3.1.2.1. Barra de herramientas	30
2.3.1.2.2. Construcción y visualización del recinto	31
2.3.1.2.3. Consulta y edición de las características de la sala	32
2.3.1.2.4. Visualización de los parámetros acústicos	32
2.3.1.3. Entorno del EASE 4.0	33
2.3.1.3.1. Edición y visualización del recinto	34
2.3.1.3.2. Consulta y edición de las características de la sala	34
2.3.1.3.3. Visualización de los parámetros acústicos	35
2.3.1.3.4. Renderizado	36
<b>2.3.2. Levantamiento del recinto</b>	<b>38</b>
2.3.2.1. Obtención de las medidas dimensionales de la sala	38
2.3.2.2. Introducción de los vértices	40
2.3.2.3. Definición de las superficies	40
2.3.2.4. Situación del altavoz	41
2.3.2.5. Limitación de las áreas de audiencia	42
2.3.2.6. Distribución de los oyentes	43
2.3.2.7. Colocación de los materiales	43
2.3.2.7.1. Madera barnizada	44
2.3.2.7.2. Parquet	44
2.3.2.7.3. Butacas tapizadas	45
2.3.2.7.4. Virutas de madera compactas	45
2.3.2.7.5. Cristal	46
2.3.2.8. Iluminación del recinto	46



---

**PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA**

<b>2.4. Grabación de las muestras sonoras</b>	<b>47</b>
<b>2.4.1. Consideraciones previas</b>	<b>47</b>
<b>2.4.2. Piano de cola utilizado</b>	<b>48</b>
2.4.2.1. Descripción	48
2.4.2.2. Emplazamiento en la sala	48
<b>2.4.3. Equipamiento necesario</b>	<b>49</b>
2.4.3.1. Toma microfónica	49
2.4.3.1.1. Configuración 1	49
2.4.3.1.2. Configuración 2: Estudio de la directividad	51
2.5.1.1. Resto del equipamiento	52
2.5.1.2. Conexionados	55
2.5.1.2.1. Configuración 1	55
2.5.1.2.2. Configuración 2	56
<b>2.5.2. Software empleado: Pro Tools®</b>	<b>57</b>
2.5.2.1. Descripción	57
2.5.2.2. Grabación de audio	58
<b>2.6. Edición y análisis de las muestras sonoras</b>	<b>61</b>
<b>2.6.1. Software empleado</b>	<b>61</b>
2.6.1.1. Sound Forge™ Pro 11.0	61
2.6.1.1.1. Descripción	61
2.6.1.1.2. Edición de las muestras sonoras	63
2.6.1.2. Audacity® 2.0.6	65
2.6.1.2.1. Descripción	65
2.6.1.2.2. Visualización de formas de ondas y espectrogramas	66
2.6.1.3. Adobe Audition® CC 2014	68
2.6.1.3.1. Descripción	68
2.6.1.3.2. Visualización de espectrogramas	69
2.6.1.4. Multi-Instrument® 3.4	71
2.6.1.4.1. Descripción	71
2.6.1.4.2. Análisis del espectro frecuencial	72
2.6.1.5. Microsoft Office® Excel	74
2.6.1.5.1. Descripción	74

3.3.1.5.2. Elaboración de tablas y gráficos	74
<b>Capítulo 3: Resultados</b>	<b>77</b>
<b>PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA</b>	
<b>4.1. Cálculo del tiempo de reverberación medio del Auditorio</b>	<b>77</b>
<b>4.2. Comparativa de los 3 métodos de medida (Dirac)</b>	<b>78</b>
4.2.1. <i>Impulse response to Noise Ratio (INR)</i>	83
4.2.2. Claridad musical, $C_{80}$	83
4.2.3. Definición, $D_{50}$	83
4.2.4. Relación señal-ruido (SNR)	84
4.2.5. STI, RASTI y % ALCons	84
4.2.6. Método escogido	84
<b>4.3. Parámetros acústicos (Dirac y EASE)</b>	<b>85</b>
4.3.1. Tiempo de reverberación, $TR_{30}$	86
4.3.2. Claridad musical, $C_{80}$	87
4.3.3. Articulation Loss of Consonants, % ALCons	90
4.3.4. RApid Speech Transmission Index, RASTI	92
4.3.5. Definición, $D_{50}$	95
4.3.6. Early Decay Time, EDT	95
4.3.7. Claridad de la voz, $C_{50}$	96
4.3.8. Nivel directo ( $SPL_D$ ) y Nivel total ( $SPL_T$ )	98
4.3.9. Relación nivel directo-reverberante, D/R Ratio	103
4.3.10. Distancia crítica, $D_c$	105
4.3.11. Tiempo de llegada del sonido directo, <i>First Arrival Time</i>	108
4.3.12. Estudio de reflectogramas. Criterio de Doak & Bolt	109
<b>PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA</b>	
<b>4.4. Estudio de los armónicos</b>	<b>114</b>
4.5.1. Introducción	114
4.5.2. Descripción del método analítico	115
4.5.3. Resultados obtenidos	116

4.5.3.1. Visión general a lo largo del registro del instrumento	116
4.5.3.2. Análisis de la serie armónica de Do1	123
<b>4.5.4. Discusión de los resultados</b>	<b>125</b>
<b>4.6. Efecto de la doble caída en las envolventes</b>	<b>127</b>
<b>4.6.1. Introducción</b>	<b>127</b>
<b>4.6.2. Descripción del método analítico</b>	<b>128</b>
<b>4.6.3. Resultados obtenidos</b>	<b>129</b>
<b>4.6.4. Discusión de los resultados</b>	<b>135</b>
<b>4.7. Influencia de la dinámica</b>	<b>137</b>
<b>4.7.1. Introducción</b>	<b>137</b>
<b>4.7.2. Descripción del método analítico</b>	<b>138</b>
<b>4.7.3. Resultados obtenidos</b>	<b>139</b>
4.7.3.1. Registro grave	139
4.7.3.1.1. Forma de onda	139
4.7.3.1.2. Análisis espectral	140
▪ Comparativa entre dinámicas	142
4.7.3.2. Registro medio	144
4.7.3.2.1. Forma de onda	144
4.7.3.2.2. Análisis espectral	144
▪ Comparativa entre dinámicas	146
4.7.3.3. Registro agudo	148
4.7.3.3.1. Forma de onda	148
4.7.3.3.2. Análisis espectral	148
▪ Comparativa entre dinámicas	150
4.7.3.4. Discusión de los resultados	151
<b>4.8. Efectos de la acción de los pedales</b>	<b>153</b>
<b>4.8.1. Pedal derecho</b>	<b>153</b>
4.8.1.1. Introducción	153
4.8.1.2. Descripción del método analítico	153
4.8.1.3. Resultados obtenidos	154
4.8.1.3.1. Forma de onda	154
4.8.1.3.2. Espectro frecuencial	156

4.8.1.3.3. Espectrogramas	159
4.8.1.4. Discusión de los resultados	161
<b>4.8.2. Pedal izquierdo</b>	<b>161</b>
4.8.2.1. Introducción	161
4.8.2.2. Descripción del método analítico	162
4.8.2.2.1. Forma de onda	163
4.8.2.2.2. Espectro frecuencial	164
4.8.2.3. Discusión de los resultados	165
<b>4.8.3. Pedal central</b>	<b>165</b>
4.8.3.1. Introducción	165
4.8.3.2. Descripción del método analítico	165
4.8.3.3. Resultados obtenidos	167
4.8.3.4. Discusión de los resultados	170
<b>4.8.4. Comparativa entre los pedales derecho e izquierdo</b>	<b>170</b>
4.8.4.1. Introducción	170
4.8.4.2. Descripción del método analítico	170
4.8.4.3. Resultados obtenidos	171
4.8.4.3.1. Forma de onda	171
4.8.4.3.2. Espectro frecuencial	172
4.8.4.4. Discusión de los resultados	172
<b>4.9. Estudio de la directividad</b>	<b>174</b>
<b>4.9.1. Introducción</b>	<b>174</b>
<b>4.9.2. Descripción del método analítico</b>	<b>174</b>
<b>4.9.3. Resultados obtenidos</b>	<b>175</b>
4.9.3.1. Registro grave	175
4.9.3.1.1. Tapa abierta	176
4.9.3.1.2. Tapa cerrada	177
4.9.3.1.3. Comparación entre tapa abierta y cerrada	177
4.9.3.2. Registro medio	179
4.9.3.2.1. Tapa abierta	180
4.9.3.2.2. Tapa cerrada	181
4.9.3.2.3. Comparación entre tapa abierta y cerrada	181
4.9.3.3. Registro agudo	183
4.9.3.3.1. Tapa abierta	183

4.9.3.3.2. Tapa cerrada	184
4.9.3.3.3. Comparación entre tapa abierta y cerrada	185
<b>4.9.4. Discusión de los resultados</b>	<b>186</b>
<b>Capítulo 4: Conclusiones y líneas futuras de investigación</b>	<b>189</b>
<b>4.1. Conclusiones</b>	<b>189</b>
<b>4.2. Líneas futuras de investigación</b>	<b>200</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>201</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>207</b>
<b>Anexos I: Fundamentación teórica</b>	<b>209</b>
<b>I.A. EL SONIDO</b>	<b>209</b>
1. Definición	209
2. Generación y transmisión del sonido. Fenómeno físico	209
3. Clasificación de los sonidos	211
3.1. Sonidos periódicos o armónicos	211
3.1.1. Sonido periódico simple (tono puro)	211
3.1.2. Sonido periódico complejo o armónico	212
3.2. Sonido no periódico o aleatorio	213
4. Magnitudes físicas del sonido	214
4.1. Amplitud, A	215
4.2. Periodo, T	215
4.3. Frecuencia, f	215
4.4. Fase, $\varphi$	216
4.4.1. Diferencia de fase ( <i>phase shift</i> )	216
4.5. Velocidad, c	216
4.6. Longitud de onda, $\lambda$	217
5. Cualidades del sonido	218
5.1. Intensidad	218
5.1.1. Intensidad acústica (I)	219
5.1.2. Nivel de intensidad sonora ( $L_i$ )	219
5.2. Tono o altura	220

5.3. Timbre	220
5.4. Duración	221
<b>6. La audición</b>	<b>221</b>
6.1. El sistema auditivo	222
6.2. Sensaciones psicoacústicas	223
6.2.1. Sonoridad	223
6.2.2. Direccionalidad	224
6.2.2.1. Efecto difractor de la cabeza	224
6.2.2.2. Efecto Haas	225
6.2.3. Espacialidad	226
6.2.4. Enmascaramiento	227
<b>7. Representaciones gráficas del sonido</b>	<b>229</b>
7.1. Forma de onda	229
7.1.1. Envolvente	229
7.2. Espectro acústico	231
7.2.1. Bandas de frecuencia	231
7.2.1.1. Bandas de octavas	231
7.2.1.2. Bandas de tercios y de doceavos de octavas	234
7.3. Espectrograma	236
<b>I.B. ACÚSTICA DE RECINTOS</b>	<b>237</b>
<b>1. Campo directo y campo reverberante</b>	<b>237</b>
1.1. D/R Ratio	237
1.2. Distancia crítica y distancia límite	238
<b>2. El sonido reflejado</b>	<b>238</b>
2.1. El efecto subjetivo de las primeras reflexiones	239
<b>3. El sonido absorbido</b>	<b>241</b>
3.1. Absorción en el aire	241
3.2. Absorción en los materiales	242
3.2.1. Coeficiente de absorción ( $\alpha$ )	242
3.2.2. Absorción (A)	242
3.2.3. Clasificación de los materiales y sistemas acústicos absorbentes	242
3.2.3.1. Materiales absorbentes porosos	242
3.2.3.2. Sistemas absorbentes por elasticidad	244
3.2.3.3. Sistemas absorbentes por resonancia	245

<b>4. Parámetros acústicos de una sala</b>	<b>246</b>
4.1. Tiempo de reverberación, $TR_{60}$	246
4.1.1. Tiempo de reverberación óptimo, $TR_{mid}$	246
4.1.2. Cálculo del TR	247
4.1.3. Medida del TR	248
4.2. Parámetros de inteligibilidad	248
4.2.1. Pérdida de articulación de las consonantes, %ALCons	249
4.2.2. STI y RaSTI	250
4.3. Parámetros de energía	251
4.3.1. Definición, $D_{50}$	251
4.3.2. Claridad de la voz, $C_{50}$	252
4.3.3. Claridad musical, $C_{80}$	252
4.3.4. Early Decay Time, EDT	253
4.4. Otros parámetros	254
4.4.1. Impulse Noise Ratio, INR	254
4.4.2. Ganancia acústica, G	255
4.4.3. Tiempo central, $t_s$	255
4.4.4. STAGE	255
4.4.5. Weight	256
4.4.6. STI female/male	256
4.4.7. STIPA female/male	256
4.4.8. STITEL	256
4.4.9. Signal to Noise Ratio, SNR	257
<b>I.C. ACÚSTICA DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES</b>	<b>259</b>
<b>1. Clasificación de los instrumentos musicales</b>	<b>259</b>
1.1. Sistemas acústicos simples y acoplados	259
1.2. Clasificación de Sachs-Hornbostel	259
1.3. Clasificación clásica o tradicional	261
<b>2. Fundamentos físico-acústicos de los instrumentos de cuerda</b>	<b>262</b>
2.1. Vibración de una cuerda fija por ambos extremos	262
2.1.1. Obtención de la frecuencia del sonido producido	263
2.1.2. Leyes de Mersenne	265
2.2. Serie armónica	267
2.2.1. Determinación de las notas musicales de la serie	267

2.2.2. Papel de cada armónico dentro de la serie armónica	269
2.3. Excitación de las vibraciones en las cuerdas	269
2.3.1. Cuerdas percutidas	269
<b>I.D. EL PIANO</b>	<b>271</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>271</b>
<b>2. Origen y evolución histórica del piano</b>	<b>272</b>
2.1. Instrumentos precursores	273
2.1.1. Primeros cordófonos	273
2.1.1.1. Monocordio	273
2.1.1.2. Policordio	274
2.1.1.3. Salterio	274
2.1.1.4. Dulcimer o dulcemele	275
2.1.2. Incorporación del teclado	275
2.1.2.1. Clavicordio	276
2.1.2.2. Familia del clavicémbalo	278
2.2. El primer pianoforte	281
2.3. Evolución tecnológica del pianoforte	283
2.3.1. Siglo XVIII	284
2.3.1.1. Escuela alemana o vienesa	284
2.3.1.2. Escuela inglesa	286
2.3.2. Siglo XIX	289
2.4. El piano moderno	292
<b>3. Tipos de piano</b>	<b>293</b>
3.1. Piano de cola	293
3.2. Piano vertical	294
3.3. Otros pianos	295
<b>4. Anatomía y funcionamiento</b>	<b>297</b>
4.1. Cuerdas	299
4.1.1. Disposición y sujeción de la cuerda	299
4.1.2. Punto de ataque o contacto	300
4.1.3. Disposición de las cuerdas a lo largo del registro del instrumento	302
4.1.3.1. Número de cuerdas por nota	302
4.1.3.2. Sobreencordado	303
4.1.4. Propiedades físicas de las cuerdas	304
4.1.4.1. Frecuencia	304



4.1.4.2. Tensión	306
4.1.4.3. Material	306
4.1.4.4. Grosor y longitud	307
4.1.4.4.1. Factor de encordado	308
4.1.5. Inarmonía	310
4.1.6. Efecto de la doble caída en la envolvente de las notas del piano	313
4.1.6.1. Cuerda con dos direcciones de vibración	314
4.1.6.2. Cuerdas múltiples perfectamente afinadas	315
4.7.3. Cuerdas múltiples con desafinaciones entre ellas	316
4.7.4. Efecto de la doble caída a lo largo del registro	317
4.2. Mecanismo de percusión	318
4.2.1. Martillo	320
4.2.1.1. Interacción martillo - cuerda	320
4.2.2. Tecla	323
4.2.3. Báscula	323
4.2.4. Apagador	323
4.3. Teclado	326
4.4. Mueble del piano	328
4.4.1. Tabla armónica	328
4.4.2. Arpa metálica	330
4.4.3. Tapa superior	331
4.4.4. Características direccionales del piano de cola	331
4.5. Pedales	334
4.5.1. Pedal unicordio, <i>una corda</i> , celeste o izquierdo	334
4.5.2. Pedal de resonancia, de intensidad o derecho	336
4.5.3. Pedal tonal, <i>sostenuto</i> o central	338

**Anexos II: Caracterización acústica de la sala 339**

**II.A. Resultados de los parámetros acústicos en Dirac para MLS Interno, MLS Externo e Impulso Externo en todas las posiciones 339**

**II.B. Visuales del escenario del Auditorio desde las posiciones de medida 417**

<b>Anexos III: Caracterización acústica del piano de cola</b>	<b>429</b>
<b>III.A. Características del piano Steinway &amp; Sons Model D-274</b>	<b>429</b>
<b>III.B. Relación de pistas del CD de audio adjunto</b>	<b>431</b>
<b>III.C. Partituras de los fragmentos musicales interpretados</b>	<b>435</b>
<b>PRESUPUESTO</b>	<b>441</b>
<b>1. Consideraciones generales</b>	<b>443</b>
<b>2. Desglose del presupuesto</b>	<b>443</b>
2.1. Coste de amortización del <i>software</i> empleado	443
2.2. Coste de amortización del <i>hardware</i> empleado	444
2.3. Coste de amortización de los equipos	444
2.4. Alquiler de la sala	446
2.5. Honorarios de la pianista	446
2.6. Trabajo tarifado por tiempo empleado	446
2.7. Redacción, impresión y encuadernación del Proyecto	447
2.7.1. Redacción	447
2.7.2. Impresión y encuadernación	448
<b>3. Derechos de visado del COITT</b>	<b>448</b>
<b>4. Presupuesto total</b>	<b>449</b>
<b>PLIEGO DE CONDICIONES</b>	<b>451</b>
<b>PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA</b>	
<b>1. Fuente sonora Brüel &amp; Kjaer Modelo 4224</b>	<b>454</b>
<b>2. Sonómetro modular de precisión Brüel &amp; Kjaer Modelo 2231</b>	<b>457</b>
<b>3. Trípode Brüel &amp; Kjaer Modelo UA-1577</b>	<b>459</b>
<b>4. Ordenador portátil Fujitsu Siemens Amilo Xi-2428</b>	<b>459</b>
<b>5. Grabadora digital Marantz PMD-670</b>	<b>462</b>
<b>6. Telémetro láser Dle 50 Professional Bosch</b>	<b>463</b>

**PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA**

<b>7. Micrófono de condensador Behringer C-3</b>	<b>464</b>
<b>8. Previo de micrófonos Behringer Ultragain Pro MIC2200</b>	<b>465</b>
<b>9. Ordenador de sobremesa iMac</b>	<b>466</b>
<b>10. Controlador Digi 002</b>	<b>468</b>
<b>11. Pie de micrófono JB Systems (MS-21)</b>	<b>470</b>
<b>12. Auriculares de estudio Sennheiser HD-203</b>	<b>470</b>

**PARTE A Y B**

<b>13. Micrófono Brüel &amp; Kjaer Modelo 4189</b>	<b>472</b>
<b>14. Adaptador de micrófono Brüel &amp; Kjaer Modelo UA-0035</b>	<b>472</b>
<b>15. Ordenador portátil Acer Extensa 5635ZG</b>	<b>473</b>

<b>PLANOS</b>	<b>477</b>
---------------	------------



# MEMORIA



# Capítulo 1: Introducción

---

## 1.1. Objetivos del Proyecto

La realización del presente Proyecto Fin de Carrera, necesario para la obtención del título de Ingeniero Técnico de Telecomunicación, en la especialidad de Sonido e Imagen, nace de la inquietud personal por ahondar en la ingeniería acústica desde dos ámbitos: la acústica arquitectónica y la musical.

Por ello, este Proyecto se divide en los siguientes dos grandes bloques que se presentan de manera independiente a lo largo del documento:

- Caracterización acústica del Auditorio del Conservatorio Profesional de Música de Las Palmas de Gran Canaria / Conservatorio Superior de Música de Canarias en su sede de Gran Canaria.

A pesar de que en un primer momento esta investigación iba a centrarse exclusivamente en el estudio acústico del piano, mediante el análisis de las muestras sonoras grabadas en el Auditorio del Conservatorio empleando un piano de cola *Steinway & Sons D-274* que se encuentra en él, las facilidades brindadas por las directivas de ambos centros a la hora de poder ocupar la sala por el hecho de haber sido alumna en ellos condujeron a la idea de aprovechar la oportunidad y caracterizar acústicamente dicho recinto, completando así la labor iniciada por Rubén Raya Pardo en su Proyecto Fin de Carrera “Estudio acústico del Conservatorio de Las Palmas y diseño de la Sala de Banda” [1] donde describió la acústica de otras dependencias y salas de conciertos existentes en el mismo, entre ellas, la Sala de Caracol y las cabinas de estudio.

El estudio realizado el presente Proyecto se ciñe a la caracterización de la sala sin contemplar la elaboración de propuestas de mejora del acondicionamiento acústico del recinto.

- Caracterización acústica del piano de cola.

Aunque la finalidad principal de la investigación sea el estudio de las propiedades acústicas del instrumento en la actualidad mediante el análisis de las muestras sonoras del piano de cola registradas en el Auditorio del Conservatorio, también se realiza un recorrido histórico por la evolución del mismo hasta llegar al piano moderno, detallando las diferentes características constructivas y sonoras que ha tenido a lo largo del tiempo.

Este Trabajo de investigación pretende servir de consulta, fundamentalmente, a ingenieros y músicos, aunque se ha contemplado la posibilidad de que sus lectores no estén familiarizados con los términos técnicos empleados en él. Por este motivo, se ha elaborado un extenso anexo de fundamentación teórica (**Anexo I**) en el que se explican los conceptos básicos referentes al sonido, a la acústica de recintos, a la acústica de los instrumentos musicales y al instrumento musical en estudio: el piano.

## 1.2. Antecedentes en el tema de investigación

El estudio de las características acústicas del piano es un tema que ha sido investigado ampliamente durante varias décadas desde distintas perspectivas. No obstante, la gran mayoría de las fuentes bibliográficas existentes están redactadas en lengua inglesa. Son escasas las traducciones de esos escritos realizadas al castellano así como los estudios realizados originalmente en este idioma.

La búsqueda de tesis doctorales defendidas en España relacionadas con este tema de investigación no obtuvo ningún resultado. Sin embargo, se descubrieron dos Trabajos Fin de Carrera que merecen especial mención. Por un lado, Juan José Burred Sendino plasma en su escrito “La acústica del piano” (2004) [2] una excelente descripción de la acústica del instrumento basándose en los estudios llevados a cabo por otros autores. Por otro lado, destaca el Trabajo realizado en 2012 por Jessica Mora Petit [3] en el cual analiza acústicamente varias muestras sonoras de un piano de cola. Aunque la investigación llevada a cabo no es muy extensa, constituye un buen punto de partida para la elaboración del presente Proyecto.

A continuación se detalla una selección de artículos que tratan algún aspecto en concreto de la acústica del piano. Muchos de ellos han sido publicados en *The Journal of the Acoustical Society of America*, la principal fuente de difusión de investigaciones relacionadas con el estudio del sonido desde múltiples perspectivas.

Estudio de las envolventes de las notas del piano:

- Martin, D. W. (1947). *Decay rates of piano notes*. [4]

Influencia de la dinámica en el timbre del instrumento:

- Suzuki, H. (2007). *Spectrum analysis and tone quality evaluation of piano sounds with hard and soft touches*. [5]



Efecto de la acción del pedal derecho del piano:

- Lehtonen, H., Penttinen, H., Rauhala, J y Välimäki, V. (2007). *Analysis and modeling of piano sustain pedal effects*. [6]
- Lehtonen, H., Askenfelt, A. y Välimäki, V. (2009). *Analysis of the part-pedaling effect in the piano*. [7]

Características de las vibraciones producidas en las cuerdas:

- Weinreich, G. (1979). *The coupled motion of piano strings*. [8]
- Akenfelt, A. (1987). *From touch to string vibrations*. [9]

Radiación sonora de la tabla armónica:

- Wogram, K. (1988). *The strings and the soundboard*. [10]

Descripción de la acción del mecanismo de percusión:

- Hirschhorn, M. (2004). *Dynamic Model of a Piano Action Mechanism*. [11]

Además de estos, existen otros escritos que ahondan en el tema de investigación que se irán citando a lo largo de la Memoria de este Proyecto.

### 1.3. Estructura del Proyecto

El presente documento se organiza en cuatro grandes bloques: Memoria, Presupuesto, Pliego de Condiciones y Planos. La Memoria, a su vez, está dividida en los siguientes apartados:

Capítulo 1: Introducción.

Capítulo 2: Diseño y desarrollo.

Capítulo 3: Resultados.

Capítulo 4: Conclusiones y líneas futuras de investigación.

Bibliografía

Anexos

Finalmente, es necesario señalar que la toma de datos correspondiente al estudio acústico del Auditorio, así como el análisis de los mismos, se realizó de forma conjunta con Gema María Santiago Martín, compañera de estudios en la EITE, quien también incluyó la caracterización acústica de esta sala en su Proyecto Fin de Carrera: “Estudio de toma microfónica de instrumentos musicales de cuerda y viento y realización de una guía didáctica multimedia” [12].



# Capítulo 2: Diseño y desarrollo

---

## PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA

A continuación se definen las principales características de la sala estudiada así como la metodología empleada para llevar a cabo el análisis de sus condiciones acústicas. Dicho proceso puede resumirse en las siguientes etapas:

- Estudio de las dimensiones del recinto y la distribución del escenario y las diferentes áreas de audiencia dentro del mismo. Conforme al análisis realizado se selecciona la ubicación de las diferentes posiciones de medida así como la situación de la fuente sonora que excitará el volumen de la sala.
- Obtención de los parámetros acústicos del espacio. Esta investigación se enfoca desde dos vertientes complementarias:
  - Medida *in situ* de la respuesta impulsiva de la sala.
  - Simulación acústica del recinto haciendo uso del *software* EASE.

## 2.1. El Auditorio del CPMLPGC/CSMC

### 2.1.1. Emplazamiento

El recinto caracterizado acústicamente en el presente Proyecto es el Auditorio del Conservatorio Profesional de Música de Las Palmas de Gran Canaria (CPMLPGC) y del Conservatorio Superior de Música de Canarias (CSMC) en su sede de Gran Canaria.



Figura 2.1. Logos del CPMLPGC (izq.) y del CSMC (der.).

El edificio que alberga ambos centros de estudios musicales se localiza en las proximidades del casco antiguo de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, situándose su entrada principal en la Calle Maninidra nº 1.



**Figura 2.2.** Localización del inmueble. Vista satélite (izq.) y vista de callejero (der.)



**Figura 2.3.** Sede del CPMLPGC y del CSMC.

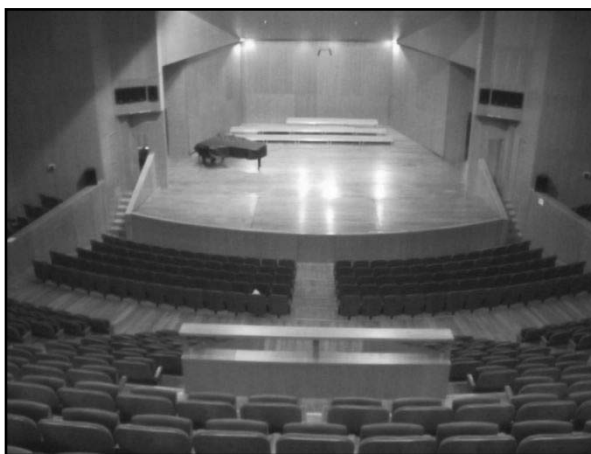
El inmueble, obra del arquitecto Juan Félix Bordes Caballero, fue construido expresamente para albergar las Enseñanzas Oficiales de Música en la isla de Gran Canaria, que hasta entonces habían tenido sus instalaciones en diferentes sedes a lo largo de su historia, siendo la Casa del Marino la ubicación inmediatamente anterior a la actual. Su inauguración tuvo lugar en el año 1994, abriendo sus puertas como centro educativo en el curso académico 1994-1995, impartándose en él los títulos oficiales de Enseñanzas Elementales, Profesionales y Superiores de Música en diversas especialidades.

### 2.1.2. Características de la sala

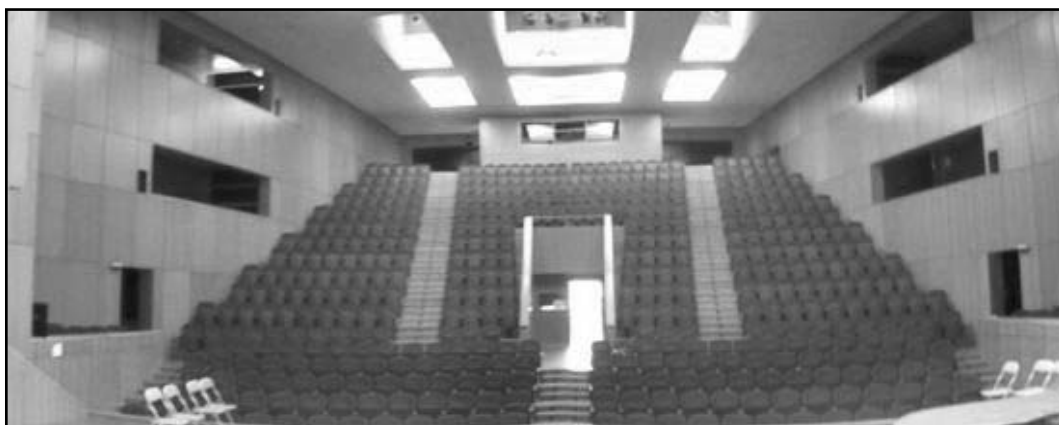
El Auditorio acoge gran diversidad de eventos, entre los que destacan la celebración de conferencias y actos académicos de distinta índole, aunque su uso más habitual es el de sala de conciertos. El estilo de música predominante en los recitales es la música clásica, interpretada en acústico y en pequeñas formaciones (música de cámara), aunque también alberga conciertos con orquesta sinfónica y gran coro.

Este recinto cuenta con unas dimensiones de 20'5 m de ancho x 38'4 m de largo x 10'6 m de alto, tiene un volumen de 4.547 m<sup>3</sup> y dispone de un aforo aproximado de 500 personas que se distribuye de la siguiente manera:

- Platea (patio de butacas): 128 personas.
- Anfiteatro: 321 personas.
- 2 Palcos de platea: 12 personas.
- 4 Palcos laterales: actualmente no disponen de butacas en su interior, pero tienen una capacidad para albergar aproximadamente 10 personas cada uno de ellos.



**Figura 2.4.** Auditorio del CSMC. Vista del escenario.



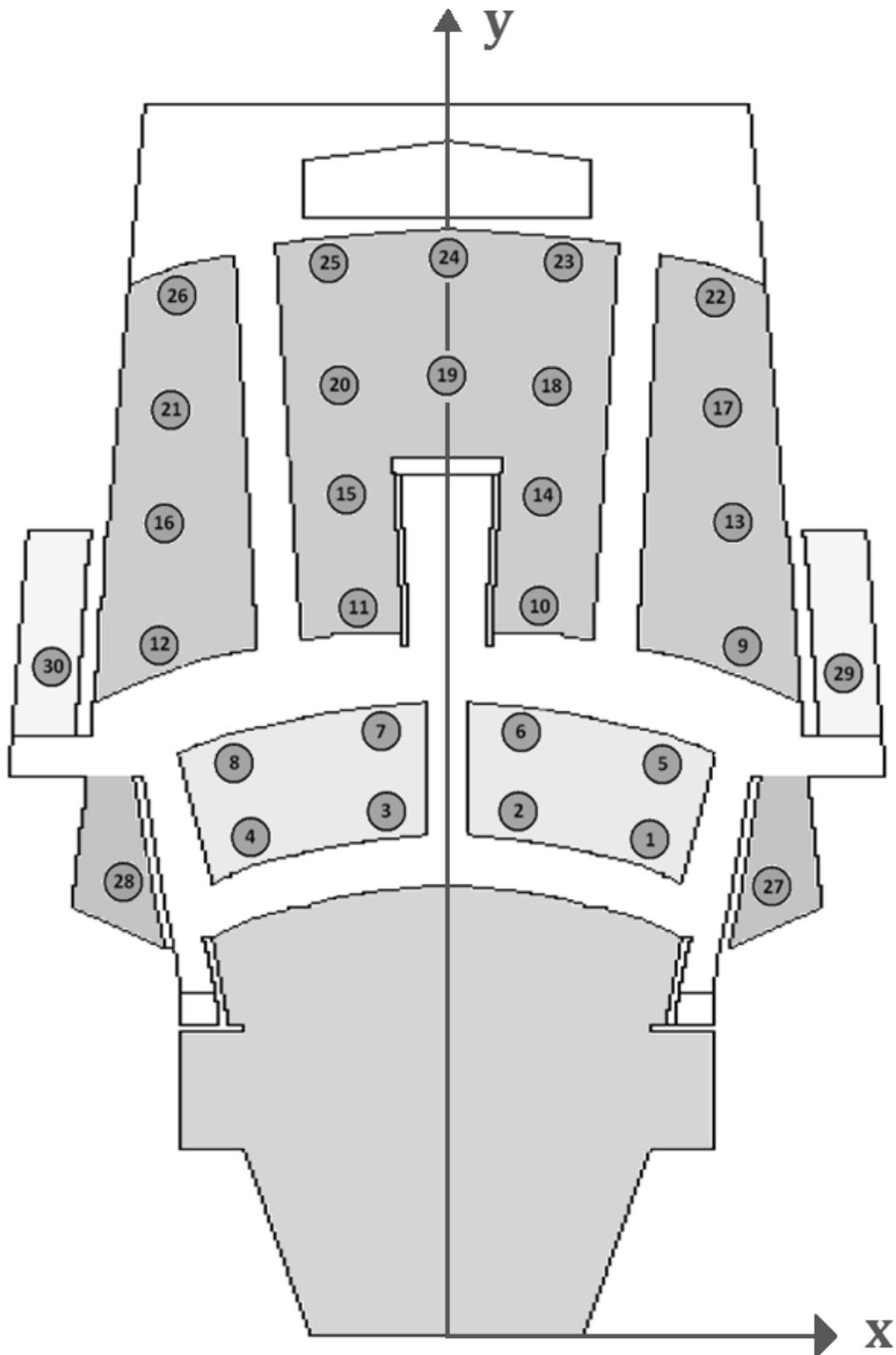
**Figura 2.5.** Auditorio del CSMC. Vista de la platea, el anfiteatro y los palcos de platea y laterales.

### 2.1.3. Situación de las posiciones de medida

Se concretaron cada uno de los puntos de la sala (30 en total) en los que tomar las medidas acústicas de la sala, diferenciando un total de cinco zonas en el interior del Auditorio: el escenario y cuatro áreas de audiencia. A continuación, en la **tabla 2.1** y la **figura 2.6** se muestra la localización de cada posición de medida en el recinto. Cabe destacar que no se pudo efectuar ninguna medición en los dos palcos laterales superiores debido a la imposibilidad de acceder a los mismos.

<b>Posiciones de medida de la respuesta impulsiva de la sala</b>					
<b>Áreas de audiencia</b>	<b>Posición</b>	<b>x (m) [Ancho]</b>	<b>y (m) [Largo]</b>	<b>z (m) [Altura]</b>	<b>Orientación horizontal (°)</b>
<b>PLATEA (PATIO DE BUTACAS)</b>	<b>1</b>	5,10	14,90	1,20	-15
	<b>2</b>	2,10	15,60	1,20	-8
	<b>3</b>	-2,10	15,60	1,20	8
	<b>4</b>	-5,10	14,90	1,20	15
	<b>5</b>	6,20	18,20	2,40	-15
	<b>6</b>	2,10	19,00	2,40	-6
	<b>7</b>	-2,10	19,00	2,40	6
	<b>8</b>	-6,20	18,20	2,40	15
<b>ANFITEATRO</b>	<b>9</b>	8,93	20,50	2,45	-25
	<b>10</b>	3,23	21,90	2,45	-10
	<b>11</b>	-3,23	21,90	2,45	10
	<b>12</b>	-8,93	20,50	2,45	25
	<b>13</b>	8,45	24,20	4,40	-20
	<b>14</b>	3,52	25,60	4,40	-9
	<b>15</b>	-3,52	25,60	4,40	9
	<b>16</b>	-8,45	24,20	4,40	20
	<b>17</b>	8,00	28,10	6,70	-15
	<b>18</b>	3,80	29,50	6,70	-8
	<b>19</b>	0,00	29,80	6,70	0
	<b>20</b>	-3,80	29,50	6,70	8
	<b>21</b>	-8,00	28,10	6,70	15
	<b>22</b>	7,40	32,60	8,80	-10
	<b>23</b>	4,00	33,50	8,80	-8
	<b>24</b>	0,00	33,70	8,80	0
	<b>25</b>	-4,00	33,50	8,80	8
	<b>26</b>	-7,40	32,60	8,80	10
<b>PALCOS DE PLATEA</b>	<b>27</b>	8,64	13,35	2,45	-57
	<b>28</b>	-8,64	13,35	2,45	57
<b>PALCOS LATERALES</b>	<b>29</b>	10,60	20,40	5,85	-38
	<b>30</b>	-10,60	20,40	5,85	38

**Tabla 2.1.** Coordenadas de las posiciones de medida.



**Figura 2.6.** Vista de planta del Auditorio. Situación y numeración de las posiciones de medida.

### 2.1.4. Situación de la fuente sonora

La fuente sonora se dispuso en la parte delantera del escenario (la está libre de la influencia directa de la concha acústica existente), a una distancia equidistante de ambas paredes laterales del recinto y apuntando hacia la audiencia con una orientación horizontal en ángulo de  $180^\circ$  y vertical de  $13^\circ$ , tal y como se muestra en la **figura 2.7**. Las coordenadas (x, y, z) de este punto son: (0,00; 9,44; 1,06).

El altavoz elegido se configuró para emitir un nivel sonoro de 100 dB teniendo en cuenta que el nivel de presión sonora radiado por una orquesta sinfónica tocando en “fortissimo” (*fff*) es de unos 93 dB SPL en el espacio libre a una distancia de 10 m de la fuente sonora, suponiendo que radia omnidireccionalmente [13] [14].



**Figura 2.7.** Localización del altavoz en el escenario.



## 2.2. Medición de la respuesta impulsiva de la sala

Con el objetivo de obtener los valores de los parámetros acústicos que caracterizan el mencionado Auditorio, se procedió a la medida de la respuesta impulsiva de la sala en diferentes posiciones de la misma utilizando la aplicación informática DIRAC 3.0. Esta medición se realizó empleando tres diferentes modos de medida (MLS Interno, MLS Externo e Impulso Externo) con el fin de contrastar los valores aportados por cada uno de ellos y así lograr una mayor fiabilidad en los resultados.

### 2.2.1. Equipamiento necesario

Los dispositivos empleados para llevar a cabo la medida fueron:

- **Fuente sonora Brüel & Kjaer modelo 4224.** Altavoz autoamplificado utilizado para reproducir las señales generadas en DIRAC con las que se excita el volumen de la sala.



Figura 2.8. Altavoz B&K 4224.

- **Micrófono Brüel & Kjaer modelo 4189.** Transductor utilizado para captar la señal acústica emitida por la fuente.



Figura 2.9. Micrófono B&K 4189.

- **Adaptador de micrófono Bruel & Kjaer modelo UA-0035.** Unión entre micrófono y sonómetro.



Figura 2.10. Adaptador de micrófono B&K UA-0035.

- **Sonómetro Bruel & Kjaer modelo 2231.** No fue utilizado como medidor de nivel de presión sonora sino como módulo intermediario para conducir la captación de la señal acústica del micrófono hasta el ordenador portátil.

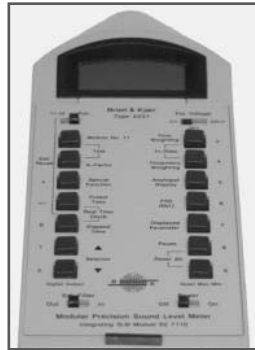


Figura 2.11. Sonómetro B&K 2231.

- **Trípode Bruel & Kjaer modelo UA-1577.** Soporte para el sonómetro.



Figura 2.12. Trípode B&K UA-1577.

- **Ordenador portátil Fujitsu Siemens Amilo XI-2428.** Usado para ejecutar Dirac y almacenar las informaciones de las medidas efectuadas.



Figura 2.13. Ordenador portátil Fujitsu Siemens Amilo XI-2428.

- **Grabadora digital MARANTZ PMD-670.** Empleada en el modo MLS Externo para grabar la señal MLS que posteriormente se reproduce.



**Figura 2.14.** Grabadora digital Marantz PMD-670.

- **Cables y conectores.** Utilizados para interconectar los dispositivos anteriores a través de cable coaxial.
  - **Cable de 20 metros (Mini Jack (macho) – BNC (macho)).**
  - **Cable de 1,5 metros (Micro Jack (macho) – Mini Jack (macho)).**
  - **Cable de 5 metros (RCA (macho) – BNC (macho)).**
  - 3 cables de alimentación para el ordenador, la fuente y la grabadora.

Tipos de conectores usados:



**Figura 2.15.** Conectores. De izquierda a derecha: Mini Jack, Micro Jack, BNC y RCA.

## 2.2.2. Software empleado: DIRAC 3.0

### 2.2.2.1. Descripción

DIRAC *Room Acoustic Software* – Type 7841 es una herramienta informática, diseñada para la plataforma Windows® por Acoustics Engineering y distribuida por Brüel & Kjael, que permite calcular un gran número de parámetros acústicos de cualquier recinto mediante el análisis de las mediciones de la respuesta impulsiva del mismo conforme a la normativa ISO 3382 (referida a la acústica arquitectónica), la ISO 18233 (métodos de medición en la acústica arquitectónica) y la IEC 60268-16 (inteligibilidad de la palabra) [15].

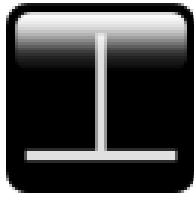


Figura 2.16. Logotipo de DIRAC.

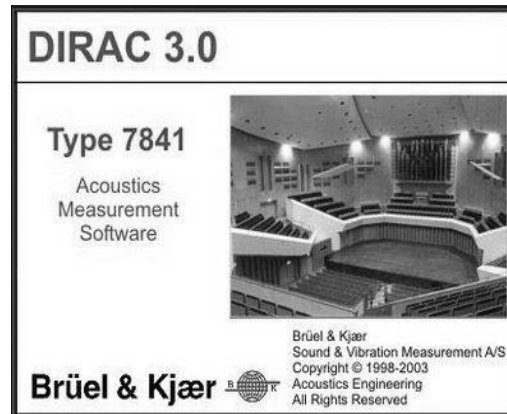


Figura 2.17. Pantalla de carga de DIRAC 3.0.

Este programa soporta una considerable variedad de configuraciones y modos de medida. Para caracterizar la respuesta impulsiva de una sala se pueden emplear diferentes señales generadas internamente por DIRAC o bien de forma externa. Estas señales son radiadas, excitando el volumen del recinto a estudiar, a través de un altavoz que actúa como foco emisor. En ocasiones, se puede prescindir del altavoz y usar directamente pequeñas fuentes sonoras con características impulsivas como pistolas de fuego o globos.

Independientemente de la naturaleza y procedencia del evento sonoro que excite la sala, se debe posicionar un micrófono en un punto elegido de la sala. Este recogerá el sonido percibido en ese lugar preciso y conducirá la señal captada al software DIRAC que, tras compararla con el estímulo sonoro original, dilucidará la respuesta impulsiva de la estancia en esa posición de medida.

## 2.2.2.2. Entorno del programa

### 2.2.2.2.1. Barra de herramientas



Figura 2.18. Barra de herramientas de DIRAC.

A continuación se especifican los menús y herramientas más relevantes que contiene.

- **Botones de reproducción y grabación:**



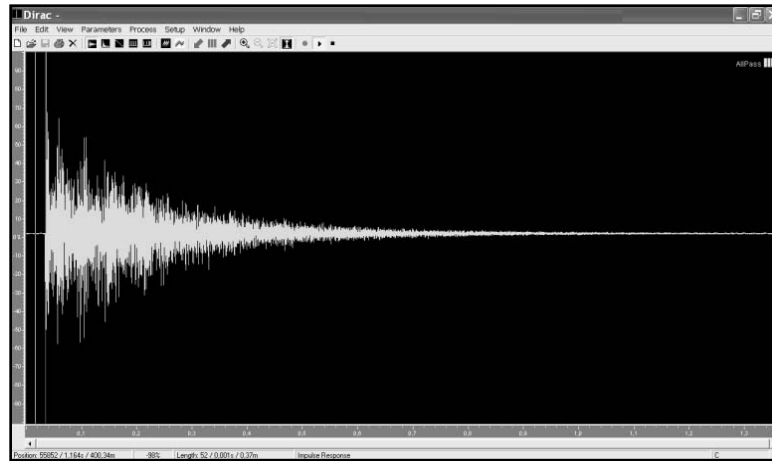
Figura 2.19. Botones de reproducción y grabación de DIRAC.

- **Botones de forma de onda:**



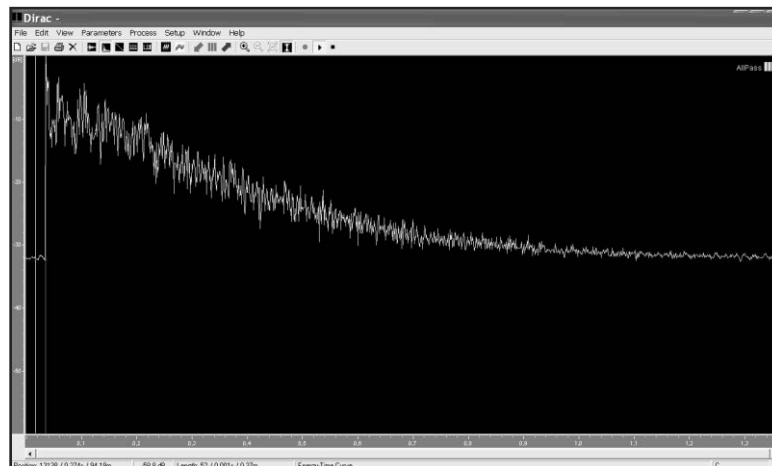
**Figura 2.20.** Botones (1, 2 y 3) de forma de onda de DIRAC.

1. **Impulse Response:** muestra gráficamente la respuesta impulsiva, es decir, la señal que se presenta en la salida de un sistema debida a una señal muy breve, o impulso, en la entrada.



**Figura 2.21.** Ejemplo de representación de una respuesta impulsiva.

2. **Energy-Time Curve (ETC):** representa la energía del suceso sonoro en función del tiempo.



**Figura 2.22.** Ejemplo de representación de una curva ETC.

3. **Decay Curve:** indica la caída del nivel de presión sonora en función del tiempo.

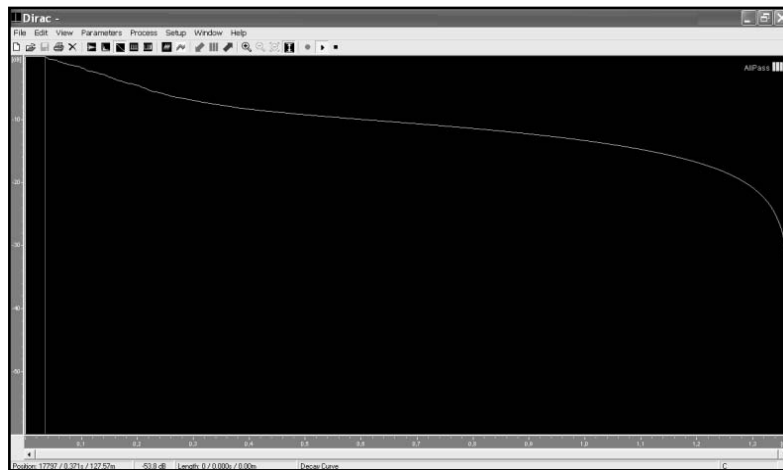


Figura 2.23. Ejemplo de representación de Decay Curve.

- **Botones de banda frecuencial:**



Figura 2.24. Botones de banda frecuencial.

Permiten mostrar la representación gráfica en las distintas bandas de frecuencia, pudiendo elegirse el desplazamiento desde 31,5 Hz hasta 16 KHz si se trabaja en octavas y desde 25 Hz hasta 20 KHz si se hace en tercios de octava.

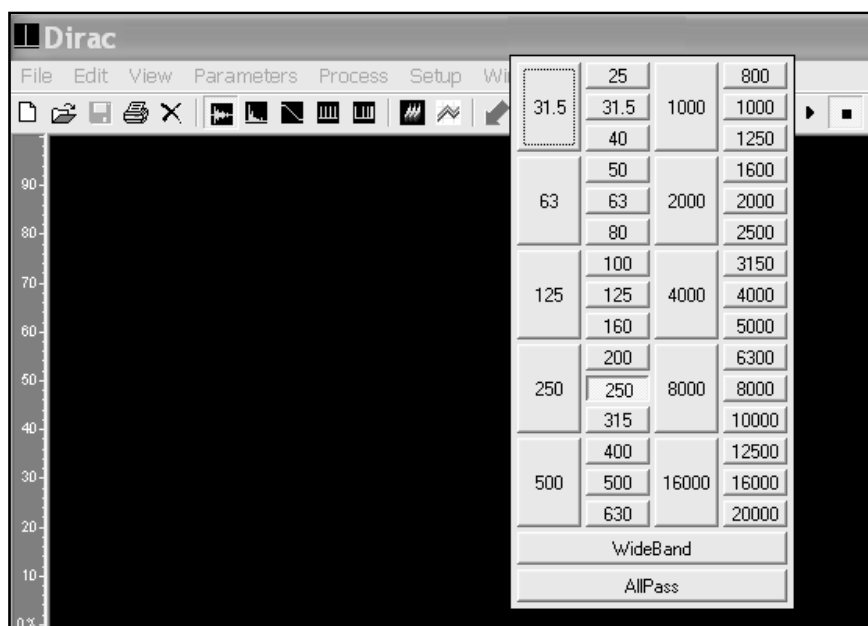


Figura 2.25. Menú de selección de bandas frecuenciales.

### 2.2.2.2. Visualización de parámetros

Una vez efectuada la medida se pueden obtener los valores de distintos parámetros acústicos.

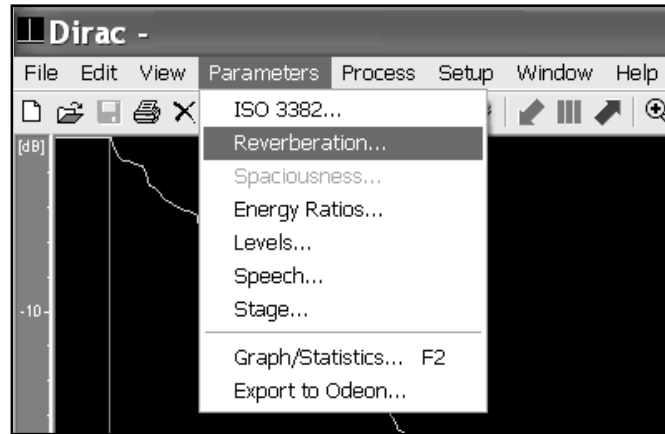


Figura 2.26. Menú de selección de los parámetros acústicos en Dirac.

#### 1. ISO 3382: Resumen de los parámetros que se contemplan en dicha norma.

	63	125	250	500	1000	2000	4000
G [dB]	--	14.84	11.47	12.39	11.30	10.22	10.23
EDT [s]	2.52	1.54	1.23	1.17	1.22	1.36	1.17
T20 [s]	--	1.81	1.42	1.22	1.20	1.22	1.13
T30 [s]	--	1.64	1.37	1.21	1.24	1.28	1.16
Ts [ms]	192.7	108.5	65.6	60.9	61.2	74.8	76.5
C80 [dB]	0.16	0.98	4.85	5.04	4.80	2.82	2.99
D50	0.56	0.37	0.63	0.56	0.64	0.56	0.52
LF	1.61	0.18	0.07	0.07	0.18	0.18	0.17

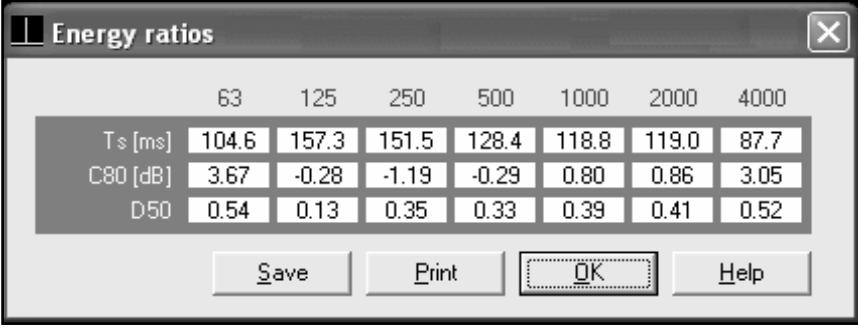
Figura 2.27. Ejemplo de la visualización de los parámetros acústicos según la norma ISO 3382.

#### 2. Reverberation: Información del EDT, T<sub>10</sub>, T<sub>20</sub> y T<sub>30</sub> con sus correlaciones.

	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT [s]	1.360	1.507	2.038	2.179	1.795	1.938	1.921	1.473	0.866	0.451
cc	-0.948	-0.988	-0.978	-0.995	-0.999	-0.992	-0.994	-0.988	-0.994	-0.994
T10 [s]	3.125	1.835	2.077	2.148	1.998	2.090	2.071	1.755	1.257	0.592
cc	-0.963	-0.986	-0.982	-0.994	-0.997	-0.998	-0.999	-0.999	-0.996	-0.992
T20 [s]	4.960	2.414	2.553	2.124	2.051	2.131	2.077	1.776	1.338	0.669
cc	-0.940	-0.993	-0.991	-0.998	-0.999	-0.999	-1.000	-1.000	-0.999	-0.998
T30 [s]	4.960	2.340	2.537	2.078	2.112	2.058	2.026	1.839	1.443	0.915
cc	-0.940	-0.997	-0.997	-0.999	-1.000	-0.999	-1.000	-1.000	-0.999	-0.996

Figura 2.28. Ejemplo de la visualización de los parámetros acústicos asociados a Reverberation.

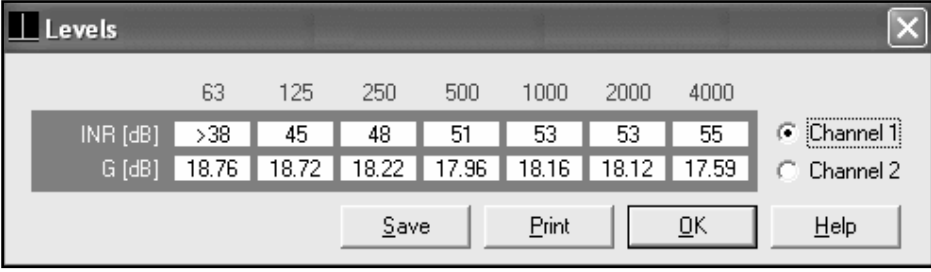
3. **Energy Ratios:** Incluye el Tiempo central, la Claridad de la voz y la Definición.



	63	125	250	500	1000	2000	4000
$T_s$ [ms]	104.6	157.3	151.5	128.4	118.8	119.0	87.7
C80 [dB]	3.67	-0.28	-1.19	-0.29	0.80	0.86	3.05
D50	0.54	0.13	0.35	0.33	0.39	0.41	0.52

Figura 2.29. Ejemplo de la visualización de los parámetros acústicos relacionados con *Energy ratios*.

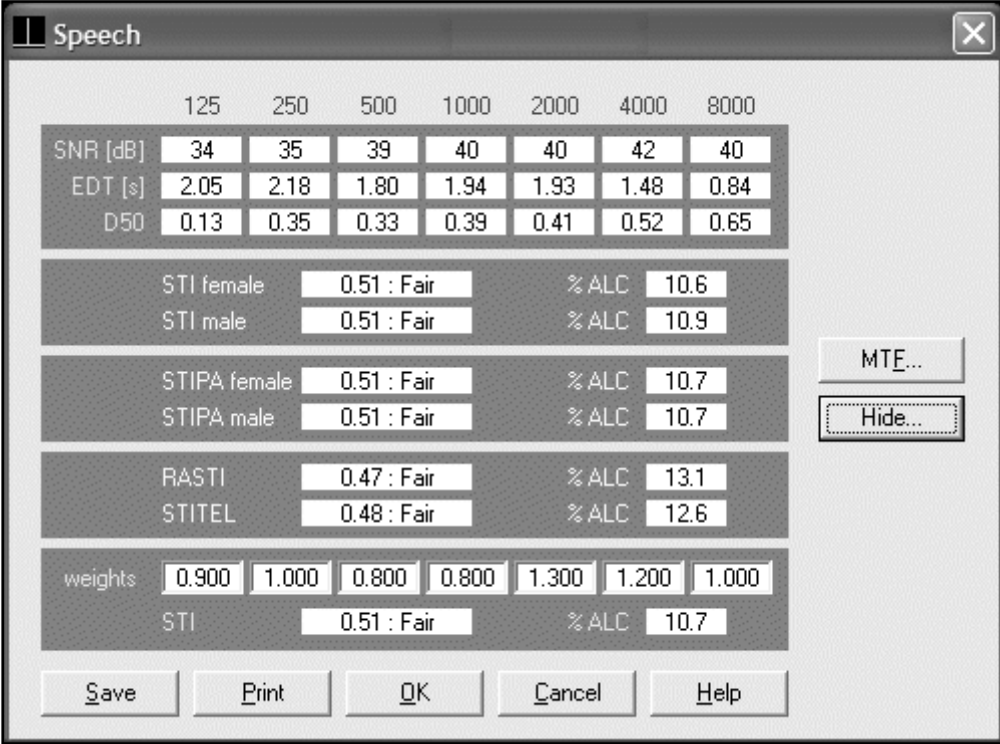
4. **Levels:** *Impulse response to Noise Ratio* y Ganancia.



	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]	>38	45	48	51	53	53	55
G [dB]	18.76	18.72	18.22	17.96	18.16	18.12	17.59

Figura 2.30. Ejemplo de la visualización de los parámetros acústicos asociados a *Levels*.

5. **Speech:** Parámetros de inteligibilidad.

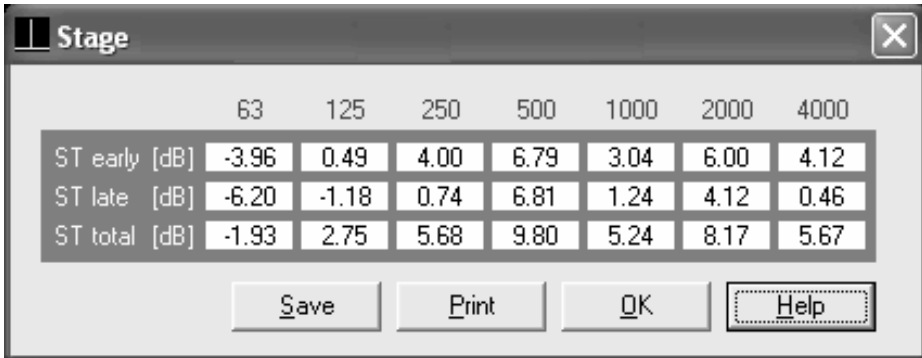


	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]	34	35	39	40	40	42	40
EDT [s]	2.05	2.18	1.80	1.94	1.93	1.48	0.84
D50	0.13	0.35	0.33	0.39	0.41	0.52	0.65
STI female	0.51 : Fair		% ALC	10.6			
STI male	0.51 : Fair		% ALC	10.9			
STIPA female	0.51 : Fair		% ALC	10.7			
STIPA male	0.51 : Fair		% ALC	10.7			
RASTI	0.47 : Fair		% ALC	13.1			
STITEL	0.48 : Fair		% ALC	12.6			
weights	0.900	1.000	0.800	0.800	1.300	1.200	1.000
STI	0.51 : Fair		% ALC	10.7			

Figura 2.31. Ejemplo de la visualización de los parámetros acústicos relacionados con *Speech*.



6. **Stage:** Nivel de las reflexiones que llegan al escenario.



	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	-3.96	0.49	4.00	6.79	3.04	6.00	4.12
ST late [dB]	-6.20	-1.18	0.74	6.81	1.24	4.12	0.46
ST total [dB]	-1.93	2.75	5.68	9.80	5.24	8.17	5.67

Figura 2.32. Ejemplo de la visualización de los parámetros acústicos asociados a *Stage*.

### 2.2.3. Modos de medida utilizados

Tal y como se ha especificado en anteriores apartados, son tres los métodos empleados en la toma de medidas de la respuesta impulsiva del Auditorio: MLS Interno, MLS Externo e Impulso Externo. En todos ellos el foco emisor, bien sea altavoz o disparo sonoro, se sitúa invariablemente en el escenario ocupando el lugar designado en el **apartado 2.1.4** del presente capítulo. Sin embargo, el equipamiento formado por micrófono - sonómetro - ordenador portátil es desplazado a cada una de las 30 posiciones de medidas detalladas en el **apartado 2.1.3**.

#### 2.2.3.1. MLS Interno

##### 2.2.3.1.1. Configuración

Consiste en excitar la sala mediante la reproducción de una señal MLS (*Maximun Length Sequence*) generada por DIRAC. Una señal MLS es “un tipo especial de ruido pseudoaleatorio muy parecido al ruido blanco con la salvedad de que es una señal periódica. Se trata de una secuencia binaria de niveles que proporciona gran cantidad de energía al sistema sin llegar a saturarlo” [16].

En este caso, la señal MLS se ha configurado con una duración de 5,46 segundos, considerando este tiempo suficiente para excitar todo el volumen del recinto, tal y como muestra la **figura 2.33**.

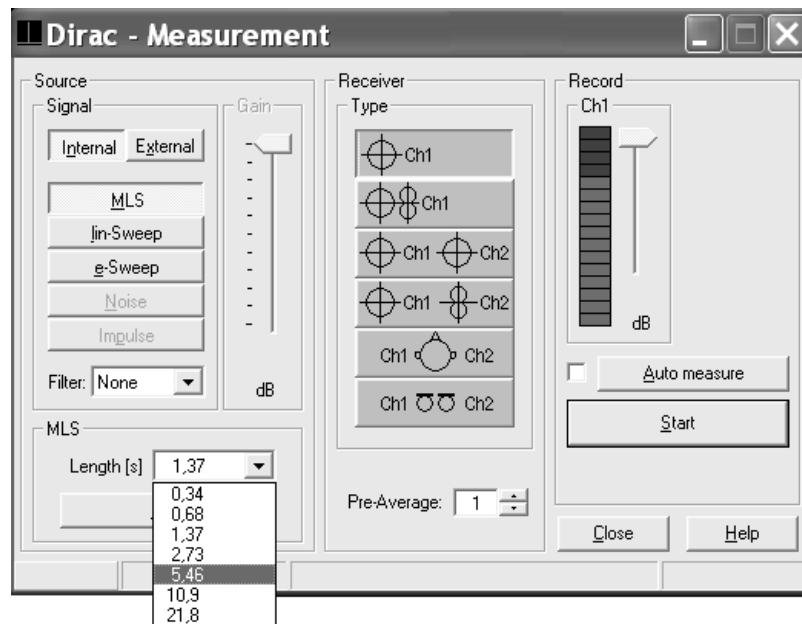


Figura 2.33. Ventana de configuración para el modo MLS Interno.

### 2.2.3.1.2. Conexionado

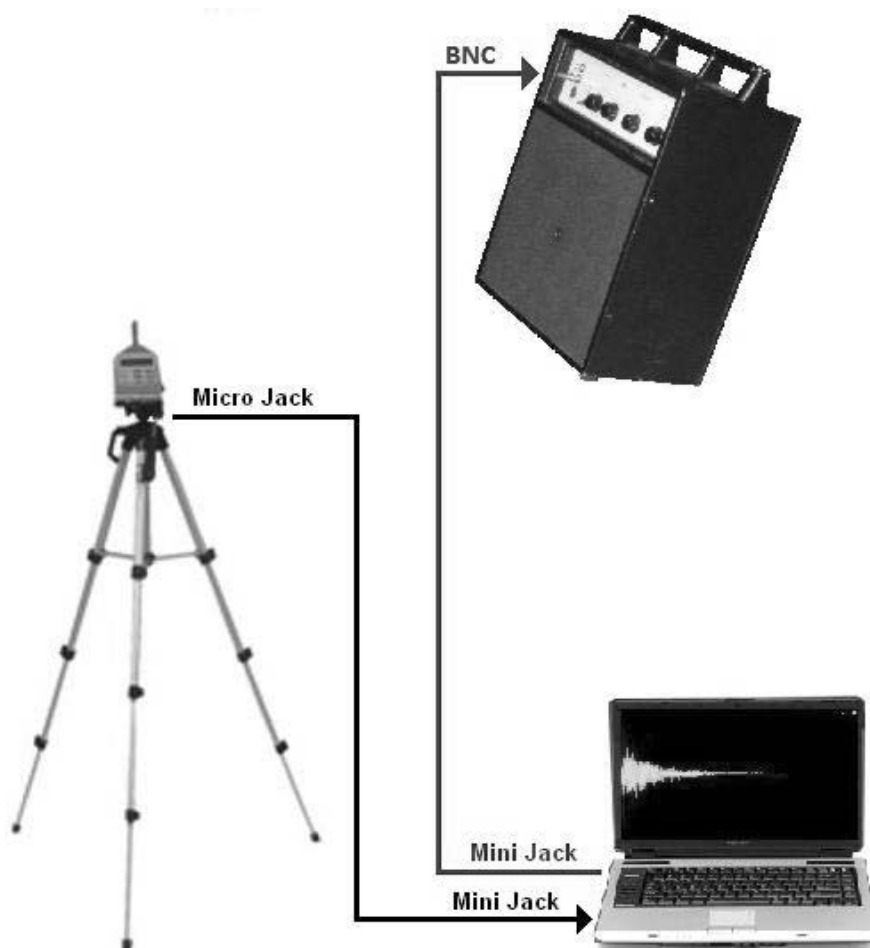


Figura 2.34. Conexionado del modo MLS Interno.

### 2.2.3.1.3. Desarrollo de la medida

Una vez configurada la señal a emitir e interconexiónados los equipos necesarios, se procede a pulsar el botón START en el *software* DIRAC. En este momento comienza a escucharse la señal MLS y, tras los 5,46 segundos estipulados el sonido cesa y la aplicación informática guarda automáticamente el audio correspondiente a la respuesta impulsiva a partir de la cual, tras procesar la información, aportará los valores de los distintos parámetros acústicos del recinto para esa posición de medida.

### 2.2.3.2. MLS Externo

#### 2.2.3.2.1. Configuración

Este modo se diferencia del anterior únicamente en que la señal MLS no es generada por DIRAC sino que es proporcionada al altavoz de forma externa. Por lo tanto, son necesarias dos fases para realizar la medida: la primera consiste en grabar la señal MLS de DIRAC en la grabadora digital y la segunda en reproducirla desde esta.

Se debe tener en cuenta que la duración de la señal grabada debe ser la misma que la del tiempo de medida (nuevamente 5,46 s) para que el resultado obtenido sea satisfactorio.

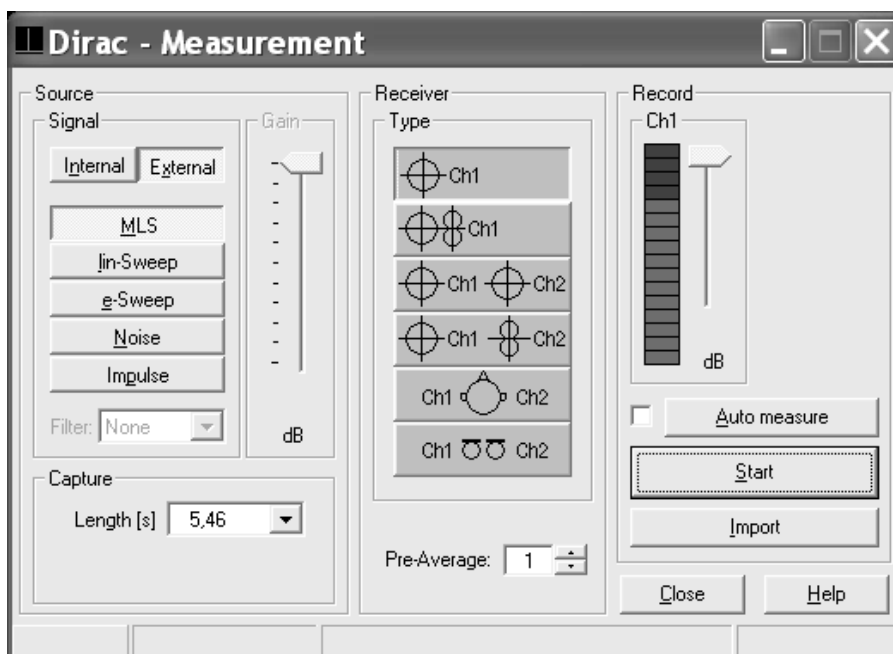
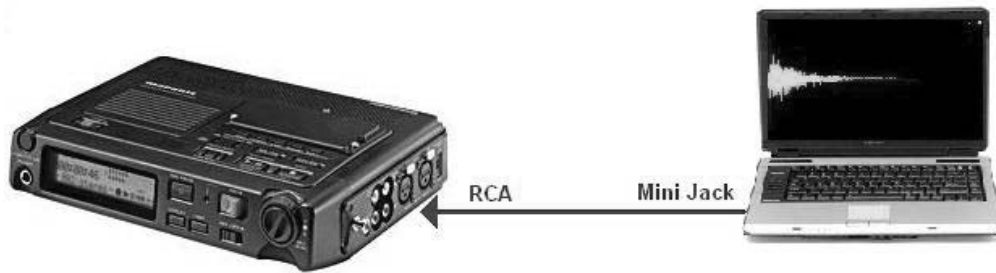


Figura 2.35. Ventana de configuración para el modo MLS Externo.

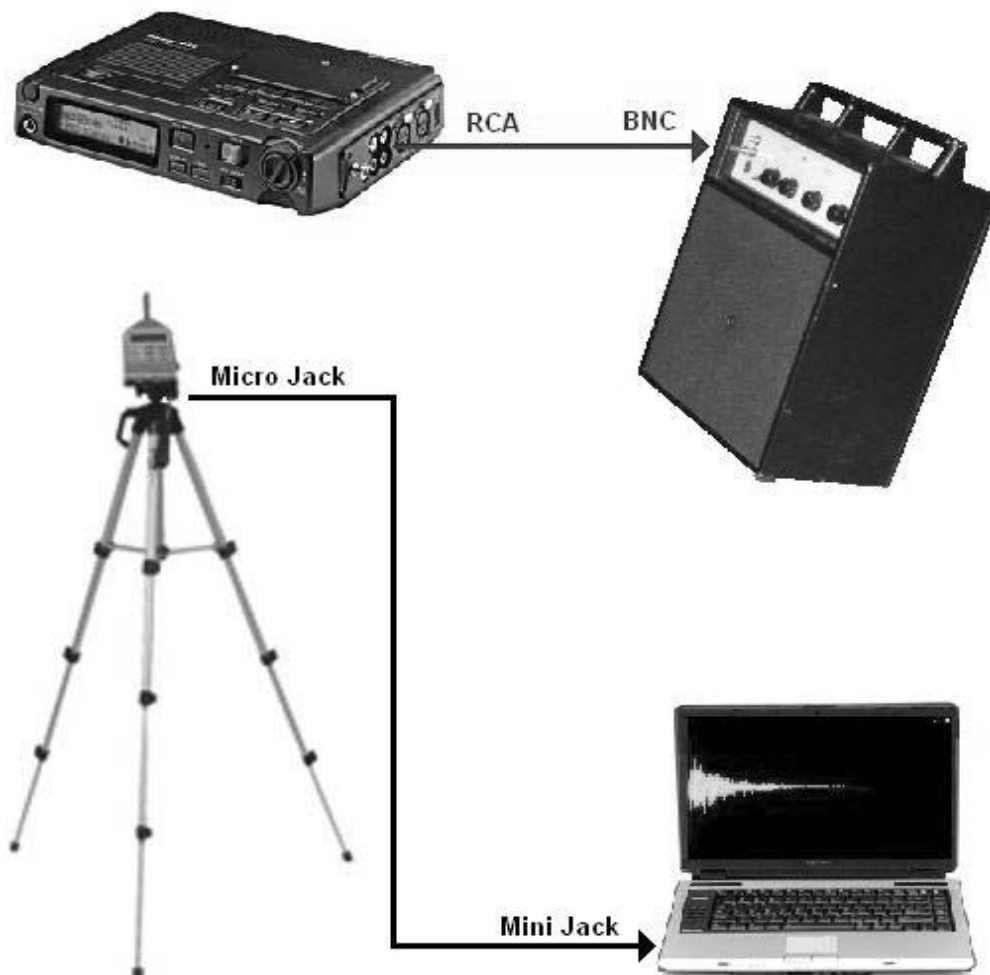
### 2.2.3.2.2. Conexionado

**Grabación:**



**Figura 2.36.** Conexionado para la grabación de la señal MLS en el modo MLS Externo.

**Reproducción:**



**Figura 2.37.** Conexionado para la reproducción de la señal MLS y medida en el modo MLS Externo.

### 2.2.3.2.3. Desarrollo de la medida

Como la señal reproducida en la grabadora debe tener la misma duración que el tiempo de medida es necesaria una completa sincronización para pulsar simultáneamente el botón PLAY de la grabadora y el START de la ventana de DIRAC. De lo contrario, la gráfica de la respuesta impulsiva obtenida se presentará dividida al no haber coincidido el tiempo de comienzo de la reproducción en la grabadora con el de la medida.

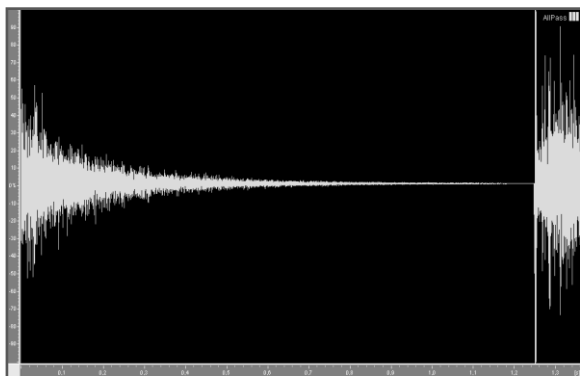


Figura 2.38. Ejemplo de respuesta impulsiva no válida.

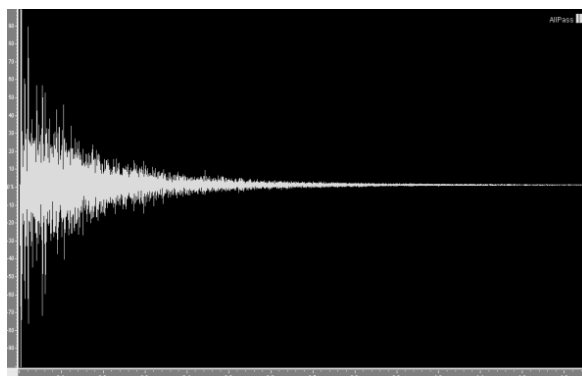


Figura 2.39. Ejemplo de respuesta impulsiva válida.

### 2.2.3.3. Impulso Externo

#### 2.2.3.3.1. Configuración

En este caso, la señal acústica empleada para excitar la sala no es MLS sino un impulso sonoro, caracterizado por tener una duración muy corta pero una gran amplitud. Para generar este tipo de evento sonoro se utilizaron globos inflados de plástico grueso que eran explotados individualmente en el momento de efectuar las mediciones.

En este modo se estableció la duración de la medida en DIRAC en 1,37 segundos ya que el impulso sonoro generado por el globo apenas perdura en el tiempo.

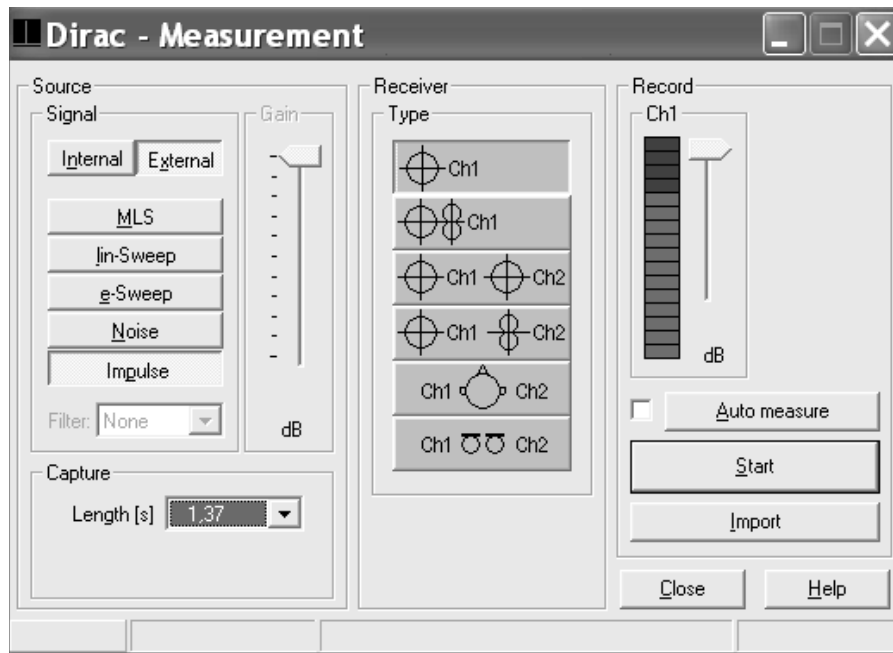


Figura 2.40. Ventana de configuración para el modo Impulso Externo.

### 2.2.3.3.2. Conexionado

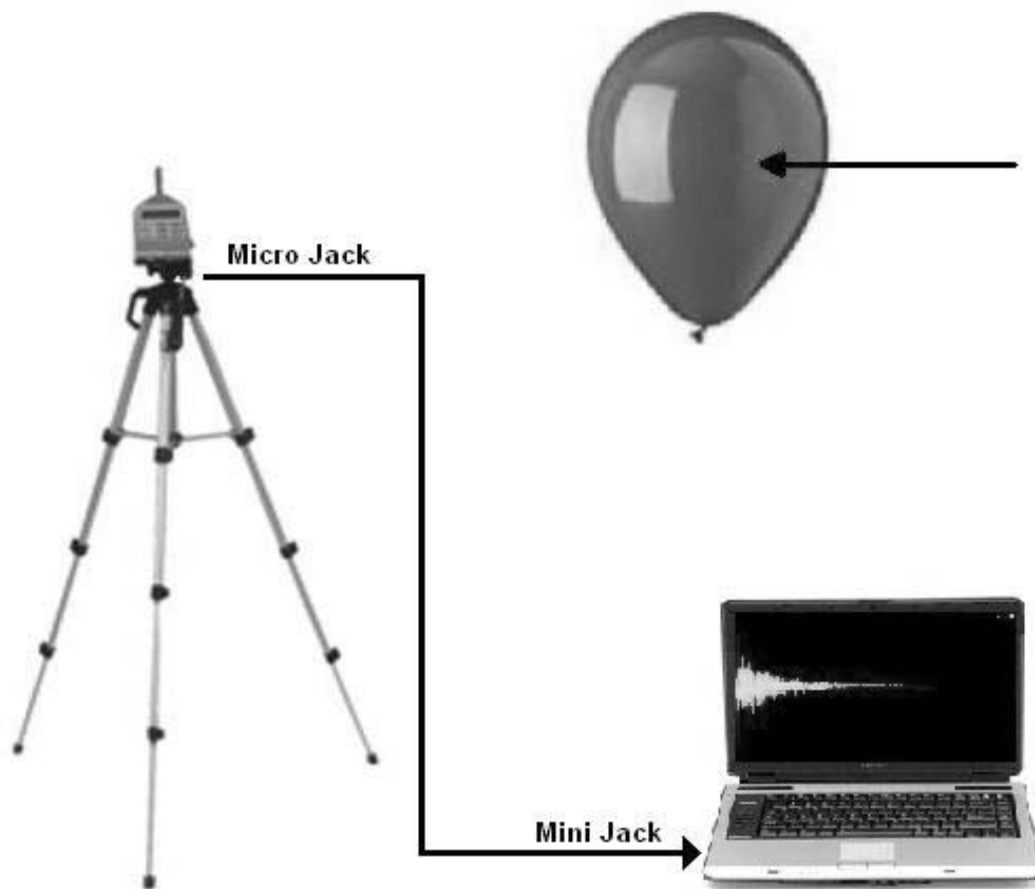
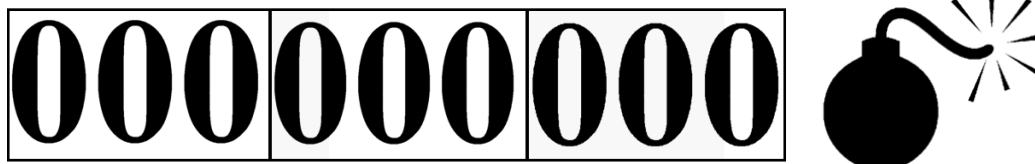


Figura 2.41. Conexionado del modo Impulso Externo.

### 2.2.3.3.3. Desarrollo de la medida

El procedimiento consiste en pulsar el botón *START* en la ventana de *DIRAC* y esperar el avance de una barra amarilla hasta que aparezca en pantalla el símbolo de una bomba, tal y como se muestra en la **figura 2.42**. En ese preciso instante debe producirse el impulso sonoro, es decir, romper el globo, para que *DIRAC* pueda procesar correctamente la medida.



**Figura 2.42.** Avance de la barra amarilla previo a la generación del impulso.

## 2.3. Simulación acústica

### 2.3.1. *Software* empleado: EASE

#### 2.3.1.1. Descripción

La herramienta informática de simulación acústica de recintos y de sistemas electroacústicos EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) está formada por varios módulos interconectados, cada uno de ellos con una función específica. El programa principal es EASEMainprogram y algunos de los subprogramas existentes son: EASERoom (para la creación de recintos), EASESpkr (base de datos de las fuentes sonoras), EASEView (visualización del recinto), etc. Con el paso de los años la aplicación se ha ido actualizando y más módulos con nuevas funciones se han añadido a esta, ampliando así las capacidades del *software*.

A grandes rasgos, el programa permite el levantamiento y visualización en 3D de recintos y la inclusión en ellos de distintos elementos como: materiales de revestimiento, fuentes de sonido, reforzamientos sonoros, áreas de audiencia, oyentes, etc. Tras el alzado de las salas estas son analizadas acústicamente por este a través del cálculo de una serie de parámetros sonoros que se presentan de forma numérica y mediante representaciones gráficas [17].

En la elaboración del presente Proyecto se han empleado dos diferentes versiones del *software*: la 2.1 y la 4.0.

- **EASE 2.1**

Implementada en 1993 en el entorno MSDos, esta aplicación fue utilizada en la primera fase del diseño, es decir, para el levantamiento del recinto.



**Figura 2.43.** Logotipo de EASE 2.1.



▪ **EASE 4.0**

Una vez concluida la anterior fase se importó el archivo del proyecto desde el EASE 2.1 al 4.0. Esta nueva versión fue lanzada al mercado en 2001 y su principal avance radica en una mejor visualización gráfica de los recintos debida a la posibilidad de introducir iluminación en ellos e incluir texturas a sus superficies. En cuanto a los parámetros acústicos proporcionados por EASE 4.0 no existe gran diferencia respecto a los existentes en la anterior versión del programa. No obstante, se amplía el estudio de las reflexiones y se mejora la representación gráfica de los mismos pudiendo ser visualizados en 3D.



Figura 2.44. Pantalla de cargado de EASE 4.0.

**2.3.1.2. Entorno del EASE 2.1**

Tras crear un nuevo proyecto o abrir uno existente se presenta en pantalla la ventana mostrada en la **figura 2.45**, a través de la cual es posible acceder a todas las funciones que el brinda el *software* así como conocer las principales características del proyecto.

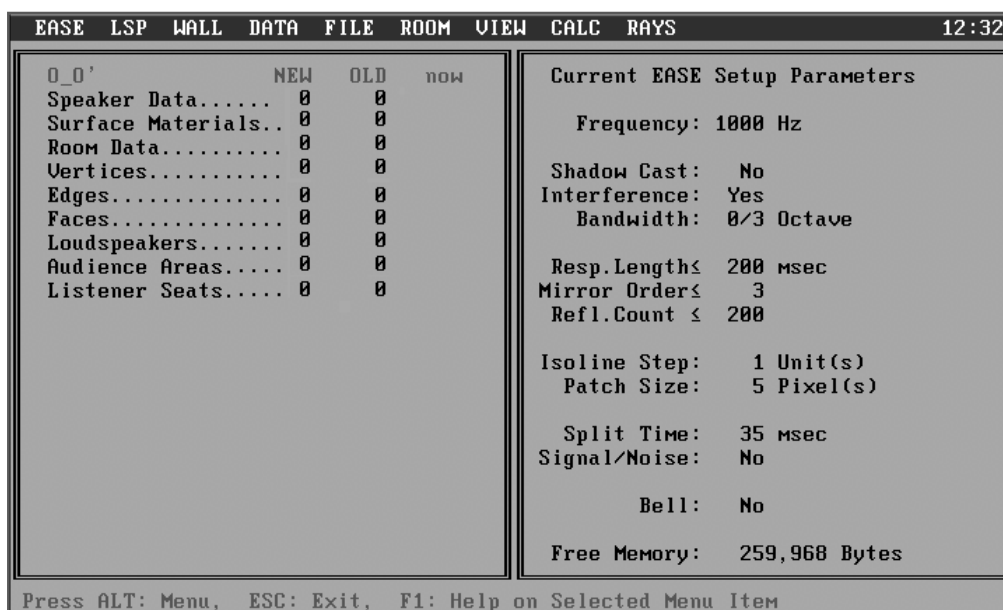


Figura 2.45. Ventana principal de EASE 2.1.

### 2.3.1.2.1. Barra de herramientas

- **EASE:** en este menú se accede a la configuración del directorio en el que se guardan todos los archivos del proyecto.
- **LSP:** en él se encuentra todo lo referente a la base de datos de los distintos altavoces.
- **WALL:** dispone de funciones asociada a la base de datos de los materiales.
- **DATA:** permite, entre otras cosas, abrir, crear o borrar proyectos además de guardar los cambios realizados en los datos del programa.
- **FILE:** contiene herramientas para editar los archivos.
- **ROOM:** permite, entre otras opciones, acceder al entorno gráfico (*View Room*).
- **VIEW:** brinda la posibilidad de visualizar el recinto desde la posición de la fuente sonora y la de los oyentes. También admite la configuración de las gamas de color del entorno gráfico.
- **CALC:** en él se obtienen las gráficas de los distintos parámetros acústicos a través de *Draw Mapping*, se muestra la gráfica de Peutz para el cálculo del %Alcons (ALConsPlot) además de poderse editar numerosos elementos del recinto como son los altavoces, las áreas de audiencia y las posiciones de escucha.
- **RAYS:** menú dedicado, principalmente, al estudio de las reflexiones que se producen en el interior de los recintos mediante el análisis de las curvas de caída y los reflectogramas.

EASE	LSP	WALL	DATA	FILE	ROOM
Exit EASE	Read Base Save Base	Read Base Save Base	Read Projects Save Projects Choose Project Create Project Delete Project	Read File Save File	Prototypes Create Shape
MATERIAL Path SPEAKERS Path PROJECTS Path EXCHANGE Path TEMPORARY Path	List Base Draw Base Edit Base Sort Base Print Base	List Base Help Base Edit Base Sort Base Print Base	List Data Read Data Check Data Save Data Save Data As	List File Print File Draw File Edit File Sort File	View Room Edit Room
Your Name Length Unit Date Format	Waste Base Erase Base	Waste Base Erase Base	Waste Data Erase Data	Waste File Erase File	Check Data Check Room
Select Printer Select Monitor Select Palette Select Sleeper Select Hot Key	Merge Base Select Base	Merge Base Select Base	Import DXF Export DXF	Import File Export File	Optimize RT Minimum Base
DOS Shell DOS Command	Import Base Export Base About Base AcoustaCADD	Import Base Export Base AcoustaCADD	AcoustaCADD		Material Dye Mixed Colors

Figura 2.46. Menús: EASE, LSP y WALL.

Figura 2.47. Menús: DATA, FILE y ROOM.



Figura 2.48. Menús: VIEW, CALC y RAYS.

### 2.3.1.2.2. Construcción y visualización del recinto

Para observar la representación de la sala se accede a través de la ruta *ROOM - View Room*.

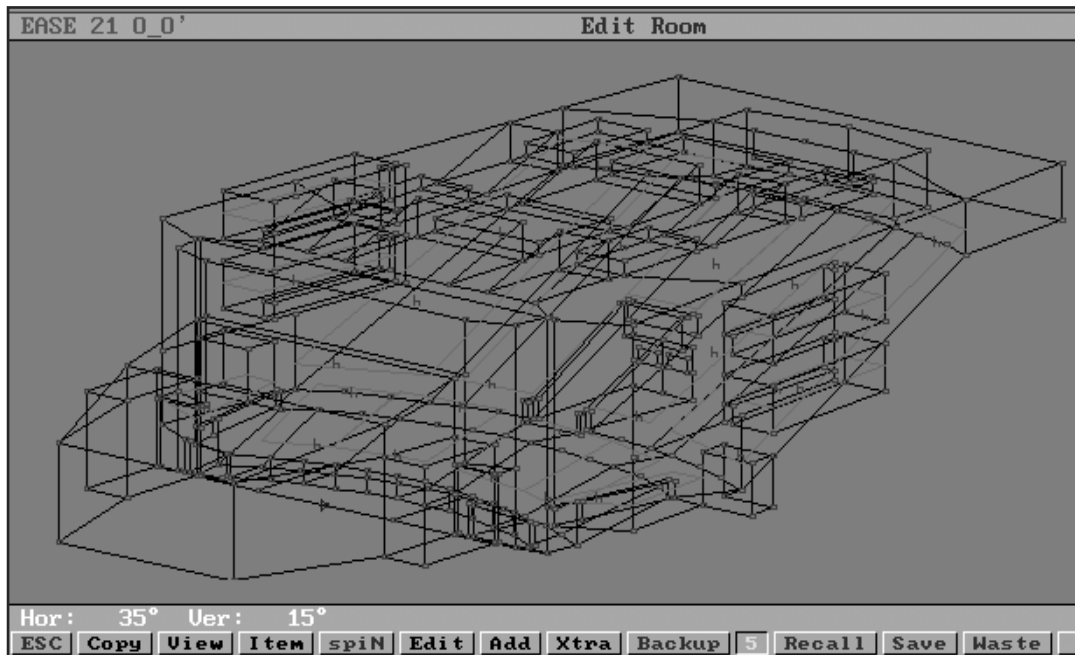


Figura 2.49. Visualización del Auditorio a través de la ruta *ROOM - View Room*.

En la barra de herramientas inferior se encuentran múltiples pestañas, que permiten acceder, entre otras funciones, a: añadir vértices y caras, asignar materiales, capturar imágenes de la pantalla del programa, seleccionar los elementos visibles en el recinto, configurar los distintos ángulos de visión respecto a los ejes de coordenadas, comprobar que no existen

errores en el levantamiento de la sala (hoyos, superficies no planas, etc.), disponer de utilidades como el zoom o incluso ver una representación del recinto en un giro de 360°.

### 2.3.1.2.3. Consulta y edición de las características de la sala

En la ruta *FILE – Edit File* se puede consultar las características del recinto construido tales como su volumen, superficie y tiempo de reverberación, además de acceder y modificar las bases de datos que se están empleando en el proyecto, tal y como se refleja en la **figura 2.50**.

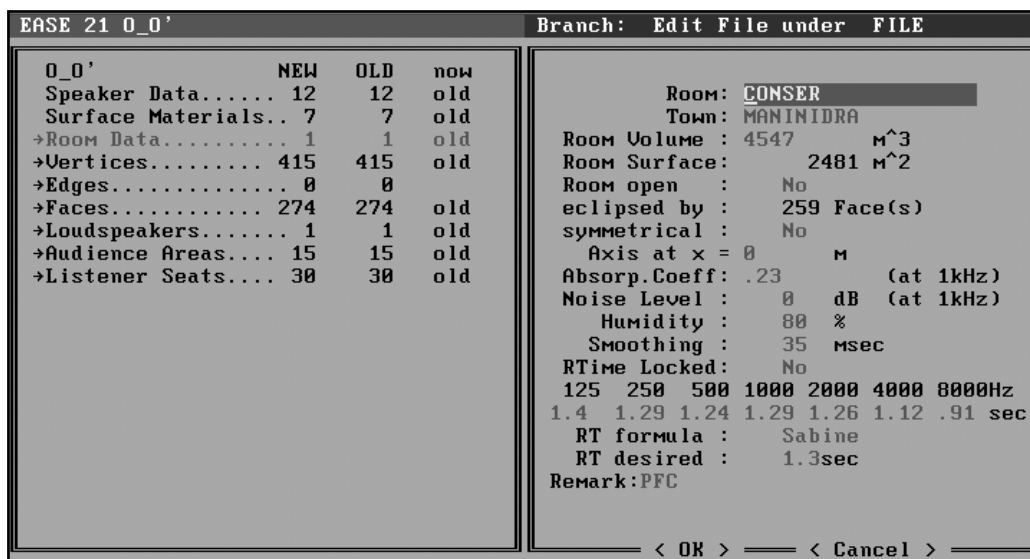


Figura 2.50. Consulta de las características de la sala en la ventana *Edit File*.

### 2.3.1.2.4. Visualización de los parámetros acústicos

Finalmente, una vez concluido la construcción del recinto pueden consultarse los valores de diferentes parámetros acústicos accediendo a la ruta *CALC – Draw Mapping*.

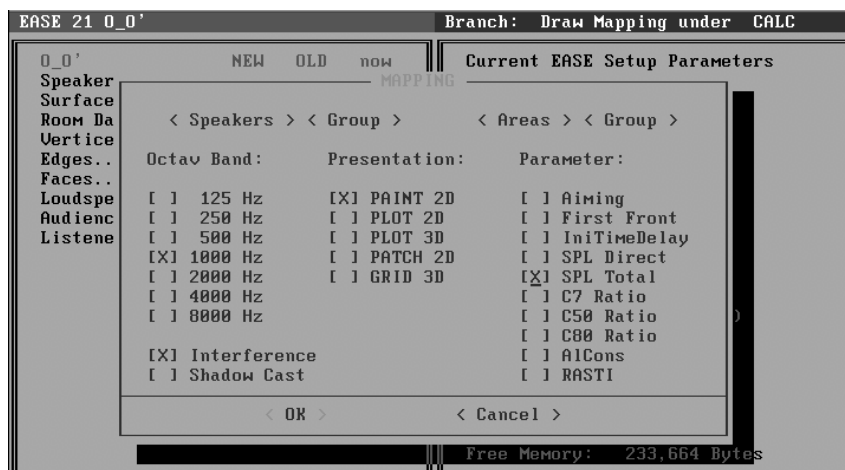


Figura 2.51. Visualización de la lista de parámetros acústicos disponibles.

Ejemplo de la gráfica de los resultados obtenidos para el nivel SPL Total de la sala:

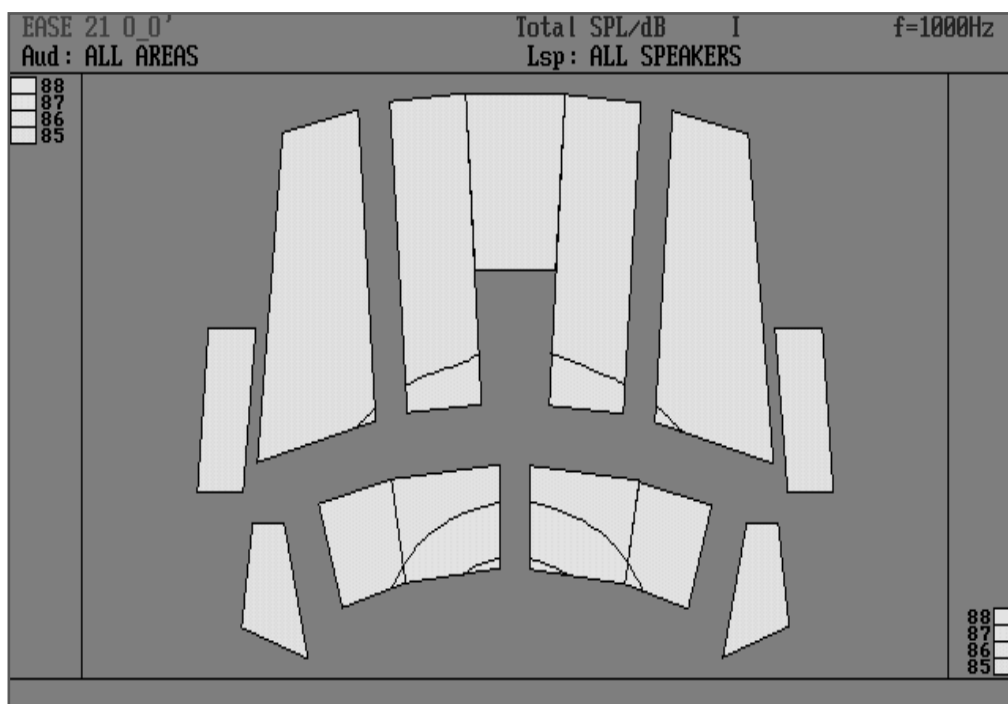


Figura 2.52. Ejemplo de visualización del nivel SPL Total del Auditorio en EASE 2.1.

### 2.3.1.3. Entorno del EASE 4.0

Una vez importado a la nueva versión del *software* EASE los archivos del recinto construido en la versión 2.1 del mismo, el aspecto de la ventana principal del programa es la que se muestra en la **figura 2.53**.

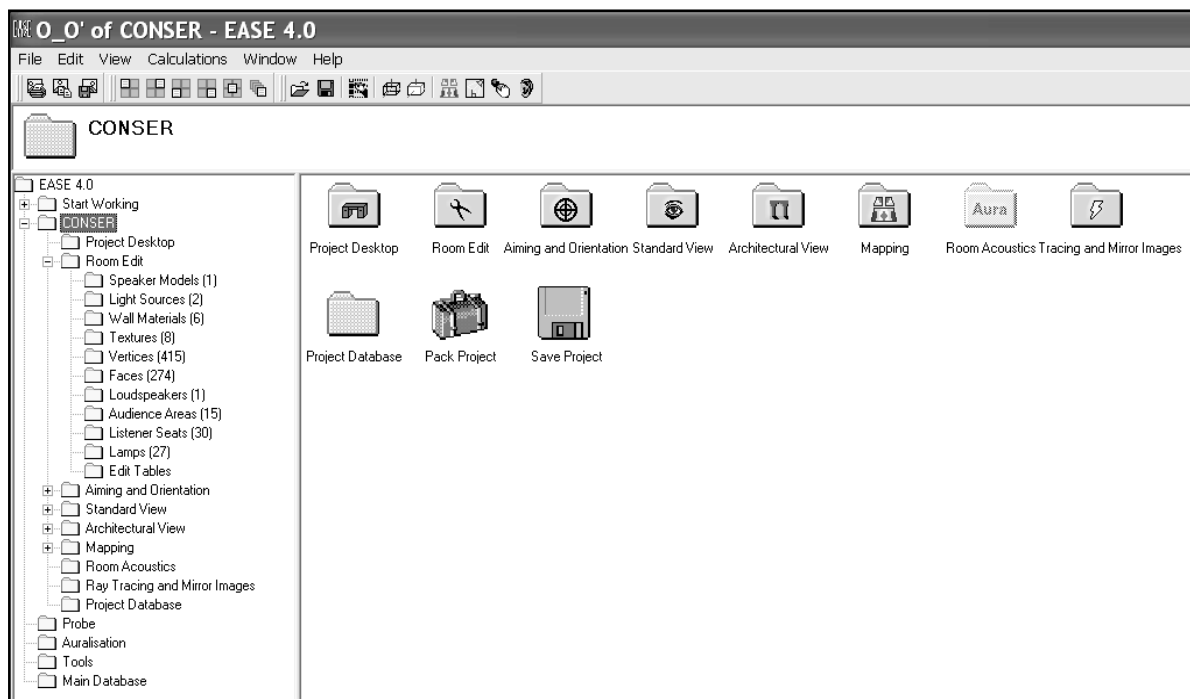
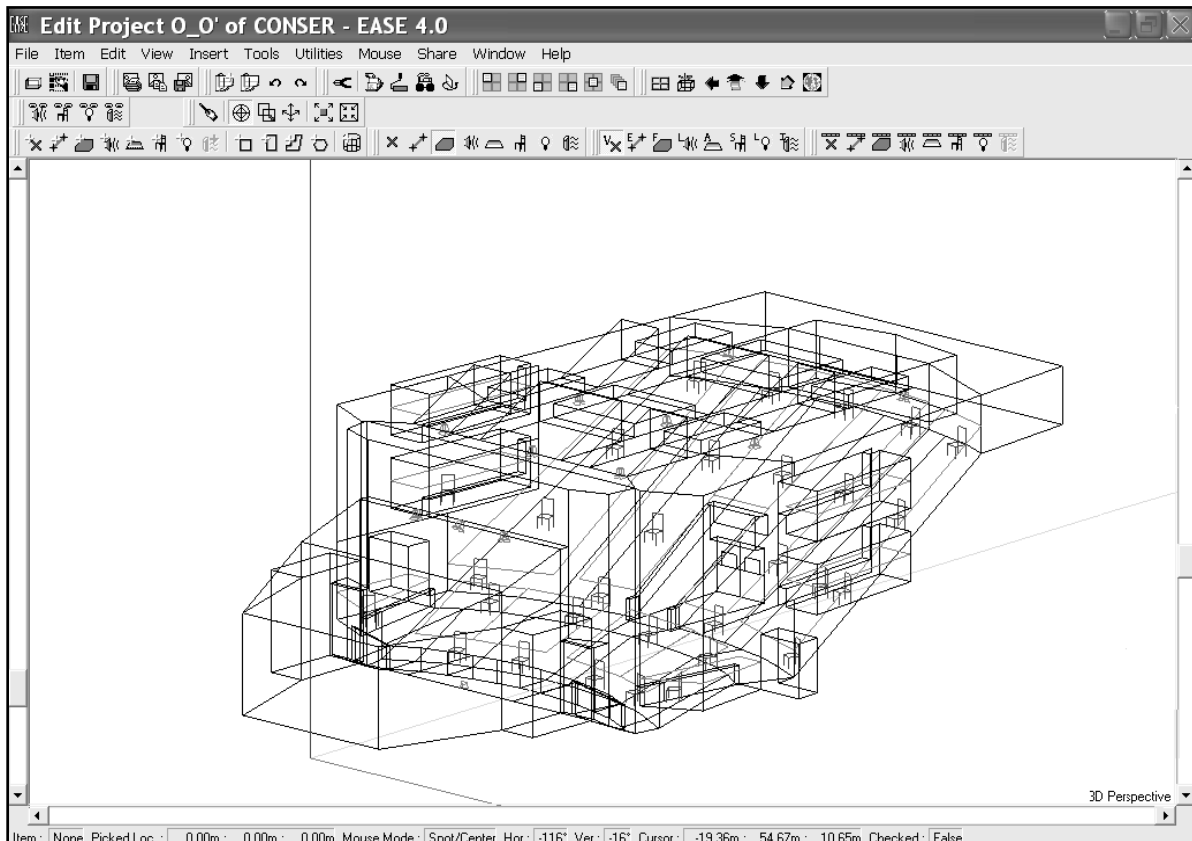


Figura 2.53. Ventana principal de EASE 4.0.

### 2.3.1.3.1. Edición y visualización del recinto

Desde el entorno de trabajo de la ventana *Edit Project* se pueden crear y visualizar todos los elementos que constituyen el recinto (vértices, superficies, áreas de audiencia, fuentes sonoras, posiciones de los oyentes, puntos de iluminación, etc.) así como modificar las coordenadas y características de los mismos.



**Figura 2.54.** Visualización del Auditorio en la ventana *Edit Project*.

Los elementos anteriormente citados también se pueden introducir en la ruta de *Main Database* o modificar en *Room Edit*.

### 2.3.1.3.2. Consulta y edición de las características de la sala

En la ruta *VIEW - Room Info - Data* se consigue consultar y modificar las principales características de la sala en estudio, tales como su volumen, superficie y tiempo de reverberación, tal y como se refleja en la **figura 2.55**.

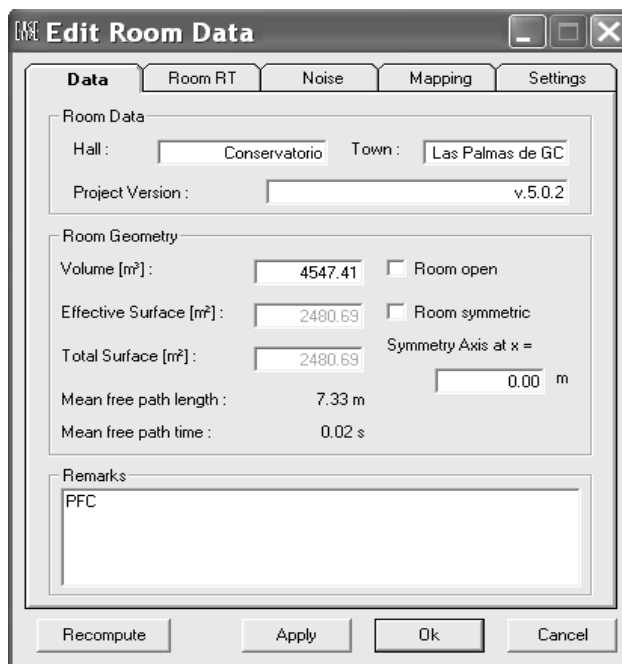


Figura 2.55. Información de la sala disponible en la ventana *Edit Room Data*.

### 2.3.1.3.3. Visualización de los parámetros acústicos

Los valores y gráficas de los distintos parámetros acústicos pueden ser consultados a través de la ruta *Mapping*.

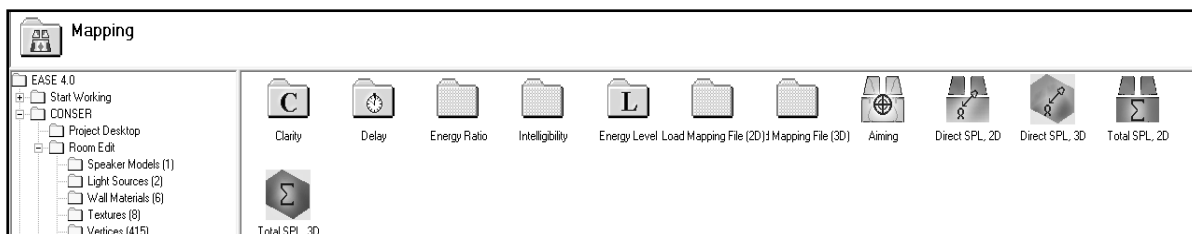


Figura 2.56. Parámetros acústicos disponibles en el menú *Mapping*.

A continuación se muestra un ejemplo de la representación del nivel total en el interior de un recinto.

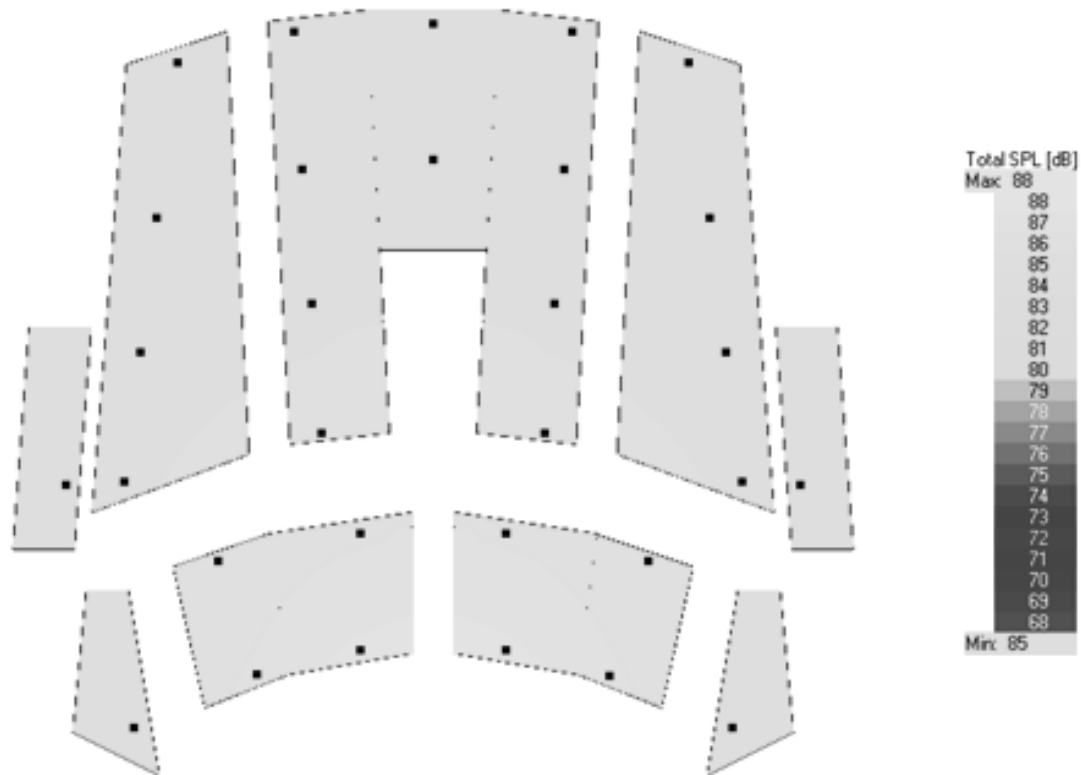


Figura 2.57. Ejemplo de visualización del Nivel SPL Total del Auditorio en EASE 4.0.

#### 2.3.1.3.4. Renderizado

El proceso que utiliza el programa para llevar a cabo la representación de las texturas y de la iluminación asignada al recinto se denomina renderizado (*render*) y se accede a él por medio de los menús *VIEW* y *CALCULATION*.

Existen varios modos de renderizado que difieren entre sí en cuanto a la calidad de imagen que proporcionan y al tiempo necesario para completar el proceso.

##### a. Renderizado sin texturas

- **Standard Rendering y Open GL Simple Map:** muestran el recinto con los colores que hayan sido asignados a cada una de las superficies, es decir, sin contemplar texturas.



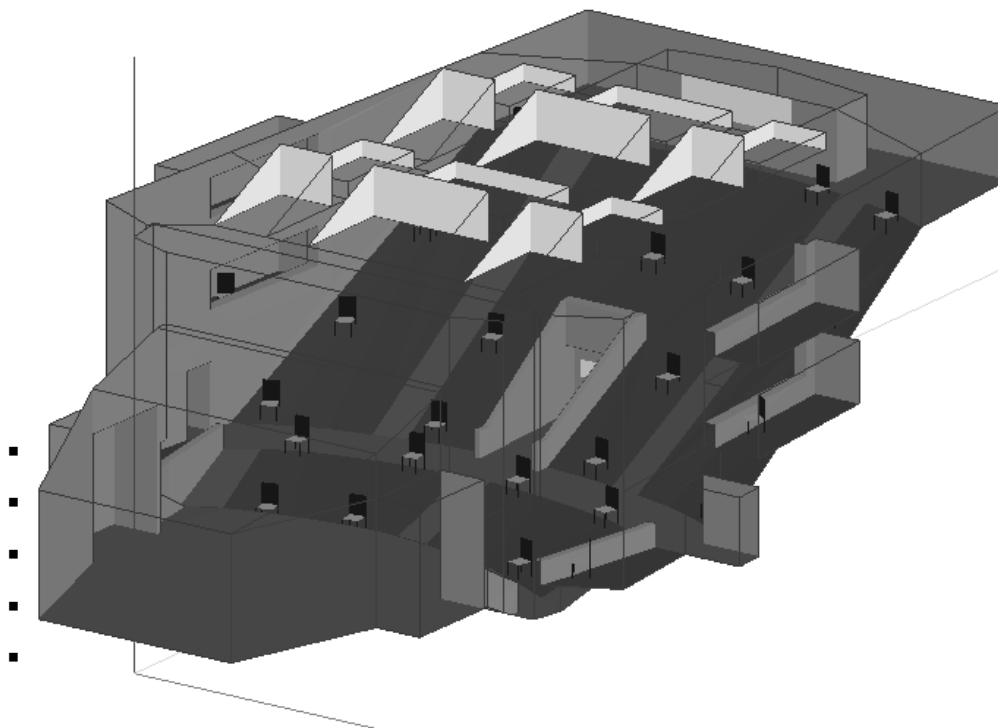


Figura 2.58. Visualización del Auditorio tras el *Standard Rendering*.

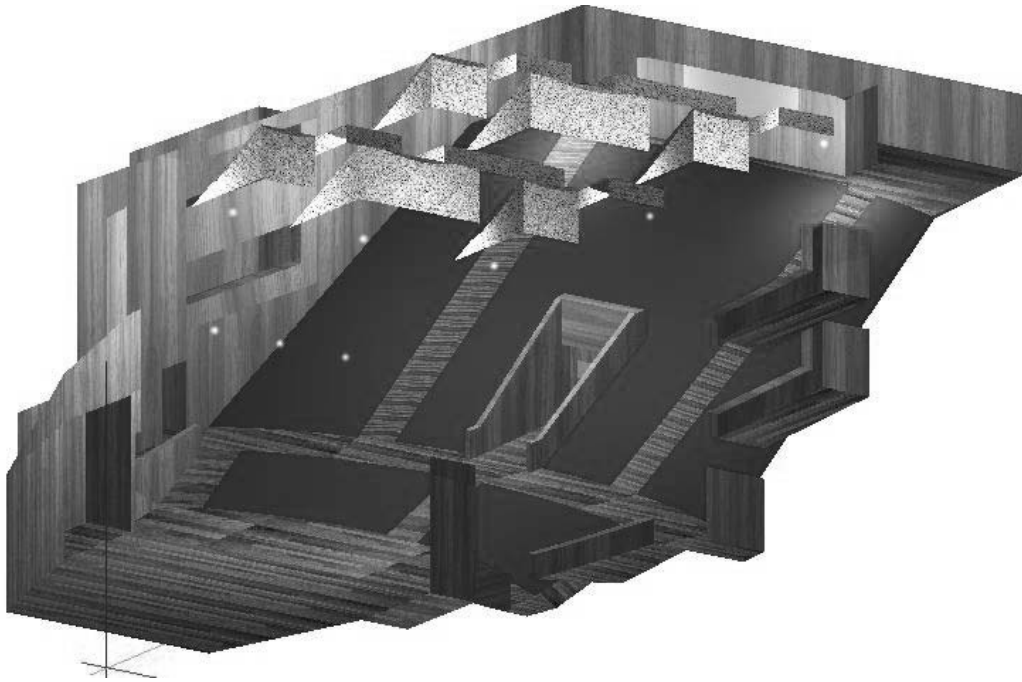
#### b. Renderizado con texturas

- **Raytracing:** es el proceso de más calidad y, por tanto, el que emplea un tiempo mayor para mostrar la representación.
- **Scanline:** efectúa un *render* más rápido que el del *Raytracing* aunque no se aprecia una notable pérdida de calidad.
- **Open GL Texture Map:** presenta un difuminado en la apariencia de las texturas.

En las siguientes **figuras 2.59 y 2.60** se observa el resultado de un renderizado *Scanline*.



Figura 2.59. Apariencia final del Auditorio tras un renderizado *Scanline* (vista desde el interior)



**Figura 2.60.** Apariencia final del Auditorio tras un renderizado *Scanline* (vista desde el exterior del mismo)

En el **Anexo II.C** se pueden consultar las visuales del escenario del Auditorio del Conservatorio desde cada una de las posiciones de medida.

## 2.3.2. Levantamiento del recinto

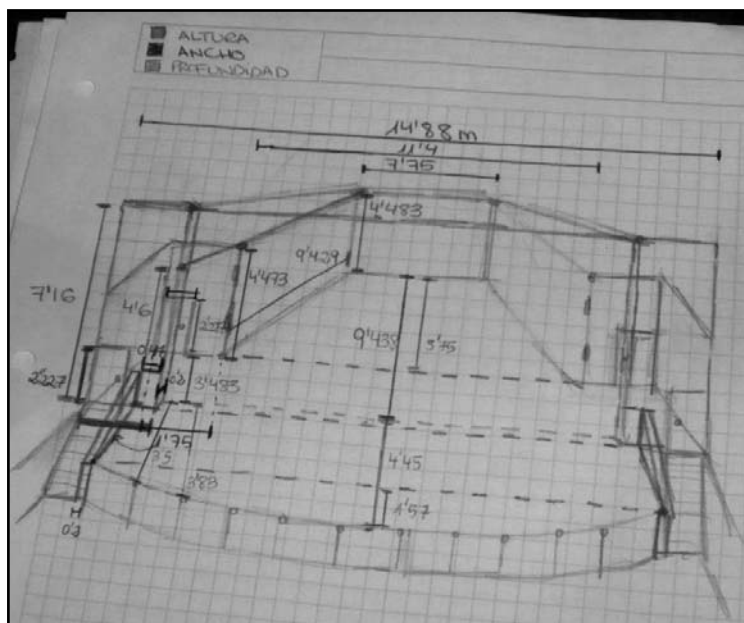
### 2.3.2.1. Obtención de las medidas dimensionales de la sala

A pesar de disponer de los planos del edificio del Conservatorio, proporcionados por la Directiva del CPMLPGC, la información que se podía extraer de ellos acerca de la estructura y las dimensiones del Auditorio era insuficiente. Por lo tanto hubo que tomar medidas adicionales *in situ* del interior del recinto empleando para ello un **telémetro láser** modelo **Bosch DLE 50 Professional**.



**Figura 2.61.** Telémetro láser.

Así, todas las cotas medidas, definidas en unidades del Sistema Internacional (metros), quedaron reflejadas en varios bocetos estructurales del Auditorio similares al mostrado en la **figura 2.62**.



**Figura 2.62.** Boceto estructural del escenario del Auditorio

Una vez obtenidos todos los datos necesarios se procedió a concretar las coordenadas (x, y, z) de cada uno de los puntos (vértices) que conforman el recinto, tomando como origen del eje de coordenadas:

- Eje X: el centro del escenario.
- Eje Y: el fondo del escenario.
- Eje Z: la altura más baja de la sala.

Tomando las anteriores referencias se consigue simplificar los cálculos ya que únicamente existen valores negativos para las cotas situadas a la izquierda del eje X, las cuales son simétricas a las existentes en el lado derecho. Además, los valores de Y son siempre positivos (desde el fondo de escenario hasta la última fila de audiencia), al igual que los de Z (desde la altura menor del recinto hasta el techo del mismo).

### 2.3.2.2. Introducción de los vértices

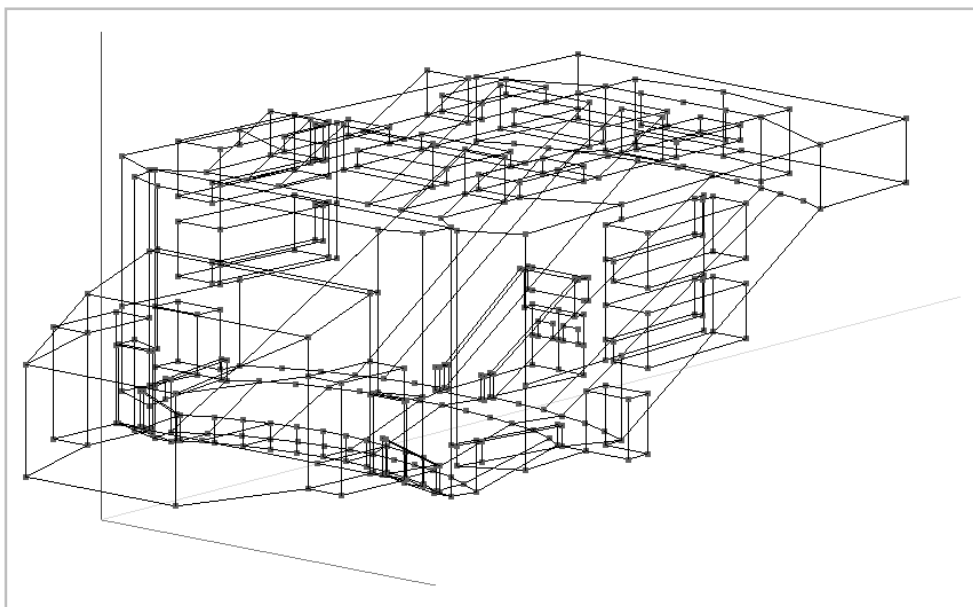
Tras concretar e introducir en el *software* EASE las coordenadas de cada uno de los vértices de la sala se pueden visualizar estos en el espacio tridimensional. En la **figura 2.63** se representa la totalidad de los vértices del Auditorio.



**Figura 2.63.** Representación de los vértices del Auditorio.

### 2.3.2.3. Definición de las superficies

El siguiente paso en la construcción del recinto es la creación de las superficies partiendo de los vértices establecidos. El resultado obtenido se muestra en la **figura 2.64**.



**Figura 2.64.** Representación de las superficies del Auditorio.

### 2.3.2.4. Situación del altavoz

A la hora de seleccionar un altavoz en la base de datos de EASE, se tuvo en cuenta que pudiera emitir un nivel de 100 dB y que tuviera características similares al empleado en la medida *in situ* de la respuesta impulsiva del Auditorio, el Brüel & Kjaer modelo 4224. Se eligió el altavoz JBL MS115 y se colocó en la misma posición que fue ubicado el anterior altavoz en la toma de medidas dentro del recinto. Las coordenadas (x, y, z) son: (0; 9,44; 1,06) y su orientación coincide con un ángulo horizontal de 180° y vertical de 13°.

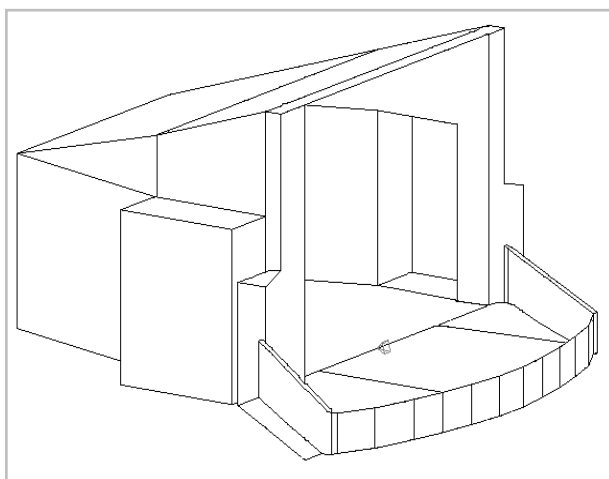


Figura 2.65. Posición del altavoz en el escenario.

En la siguiente **figura 2.66** se pueden observar, entre otras características del altavoz JBL MS115, su respuesta en frecuencia, los diagramas polares de directividad vertical y horizontal y las isobaras correspondientes a la caída de 3, 6 y 9 dB en función del ángulo de radiación.

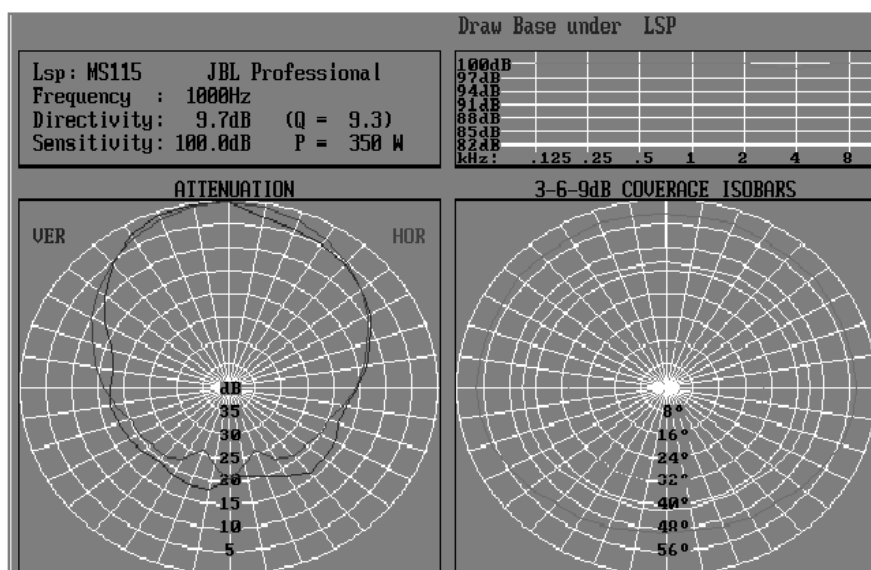
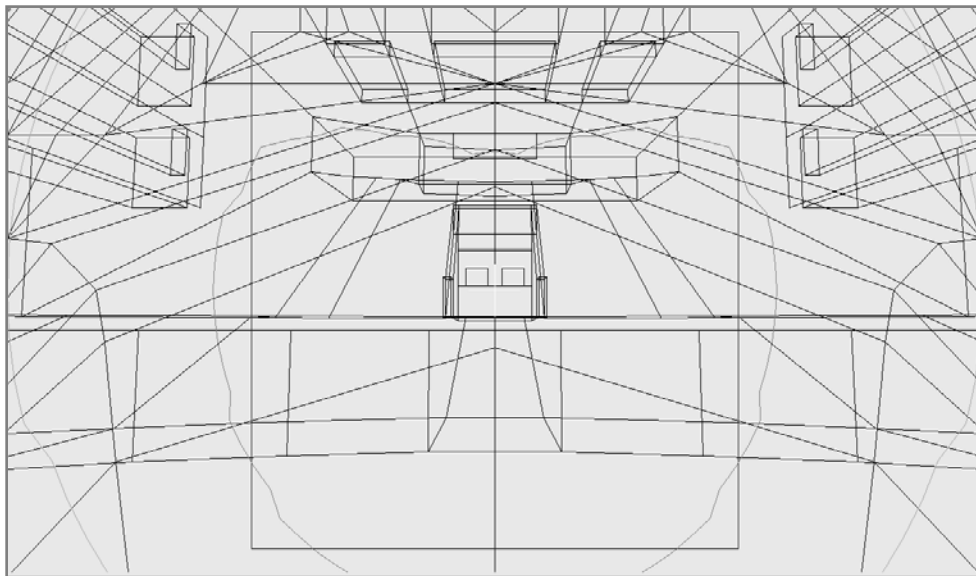


Figura 2.66. Características del altavoz JBL MS115.

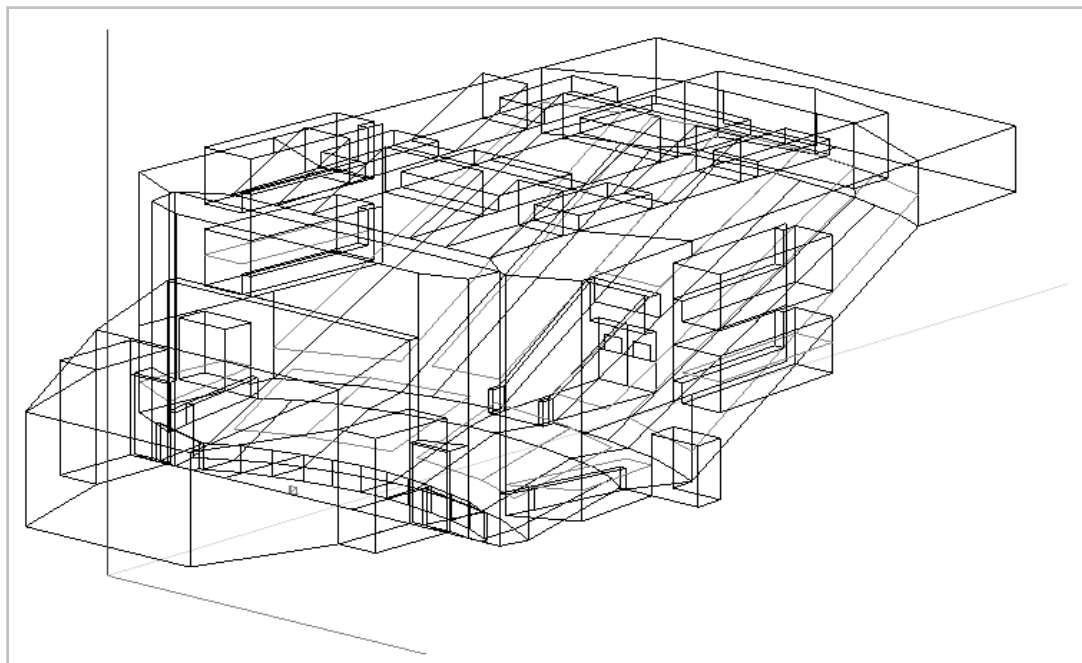
A continuación se representa la caída de 3 dB (en color rojo) y de 6 dB (en color celeste) adoptando la visión desde el propio altavoz.



**Figura 2.67.** Visión desde el altavoz JBL MS115 de las caídas de 3 y 6 dB.

### 2.3.2.5. Limitación de las áreas de audiencia

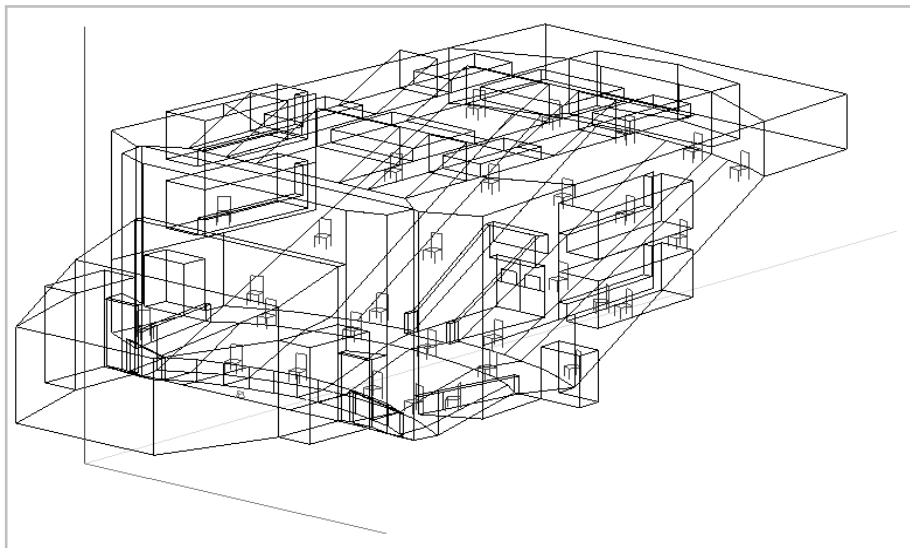
Se concretaron las áreas de audiencia en el patio de butacas, en el anfiteatro y en los distintos palcos.



**Figura 2.68.** Representación de las áreas de audiencia del Auditorio.

### 2.3.2.6. Distribución de los oyentes

Se situaron puntos de escucha en las mismas coordenadas de las 30 posiciones de medida usadas en el análisis *in situ* de la respuesta impulsiva de la sala.



**Figura 2.69.** Representación de los puntos de escucha en el Auditorio (en forma de sillas).

### 2.3.2.7. Colocación de los materiales

A continuación, se procedió al revestimiento de las distintas superficies del recinto construido. Al no haberse podido obtener información referente a los materiales acústicos reales que existen en el Auditorio se intentó encontrar en la base de datos de EASE unos materiales con los que vestir la sala que fueran lo más parecidos posible a los originales y cuyos coeficientes de absorción permitieran que la simulación tuviese el máximo de fiabilidad respecto a las condiciones acústicas reales existentes en el Auditorio. Para ello, se tuvo en cuenta principalmente respetar el valor del tiempo de reverberación de la sala medido *in situ* con el *software* DIRAC.

Se emplearon 5 materiales diferentes:

- Madera barnizada
- Parquet
- Butacas tapizadas
- Virutas de madera compactas
- Cristal

### 2.3.2.7.1. Madera barnizada

Utilizada como revestimiento de todas las paredes y muros de la sala y el techo del escenario y de los palcos.

Frecuencia	Coefficiente de absorción	Gráfica del coeficiente de absorción	Apariencia
125 Hz	0,05		
250 Hz	0,05		
500 Hz	0,03		
1 KHz	0,03		
2 KHz	0,03		
4 KHz	0,03		
8 KHz	0,03		

**Tabla 2.2.** Absorción de la madera barnizada.

### 2.3.2.7.2. Parquet

Empleado para cubrir el suelo de todo el recinto.

Frecuencia	Coefficiente de absorción	Gráfica del coeficiente de absorción	Apariencia
125 Hz	0,2		
250 Hz	0,15		
500 Hz	0,12		
1 KHz	0,1		
2 KHz	0,1		
4 KHz	0,07		
8 KHz	0,07		

**Tabla 2.3.** Absorción del parquet.



### 2.3.2.7.3. Butacas tapizadas

Material colocado en las áreas de audiencia. Los coeficientes expuestos a continuación implican que las butacas están ocupadas y tienen unas dimensiones de 0,85m x 0,63m.

Frecuencia	Coefficiente de absorción	Gráfica del coeficiente de absorción	Apariencia
125 Hz	0,72	<p>Absorption Values of BUTACAS</p>	
250 Hz	0,82		
500 Hz	0,91		
1 KHz	0,93		
2 KHz	0,94		
4 KHz	0,87		
8 KHz	0,77		

Tabla 2.4. Absorción de las butacas tapizadas.

### 2.3.2.7.4. Virutas de madera compactas

Con este material está recubierto el techo de las zonas ocupadas por el patio de butacas y el anfiteatro.

Frecuencia	Coefficiente de absorción	Gráfica del coeficiente de absorción	Apariencia
125 Hz	0,25	<p>Absorption Values VIRUTAS DE MADERA</p>	
250 Hz	0,3		
500 Hz	0,35		
1 KHz	0,3		
2 KHz	0,3		
4 KHz	0,4		
8 KHz	0,4		

Tabla 2.5. Absorción de las virutas de madera.

### 2.3.2.7.5. Cristal

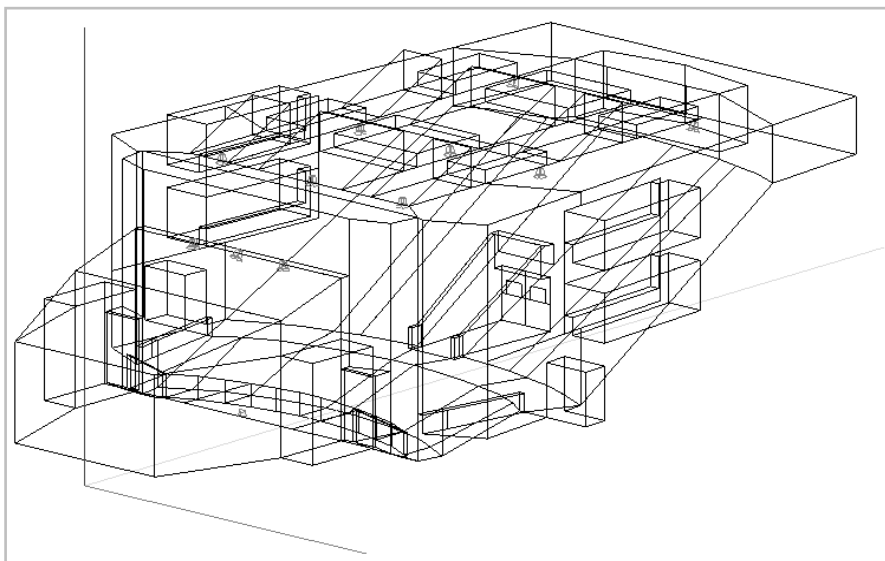
Colocado en las ventanas de la puerta de acceso y de la cabina de control de sonido que está situada en la parte superior del anfiteatro tras la última fila de butacas.

Frecuencia	Coefficiente de absorción	Gráfica del coeficiente de absorción	Apariencia
125 Hz	0,04		
250 Hz	0,04		
500 Hz	0,03		
1 KHz	0,03		
2 KHz	0,02		
4 KHz	0,02		
8 KHz	0,02		

**Tabla 2.6.** Absorción del cristal.

### 2.3.2.8. Iluminación del recinto

Por último se colocaron varios focos de luz en el recinto, simulando los puntos de iluminación reales que existen en el Auditorio, para poder visualizar correctamente la sala al realizar el renderizado de la imagen.



**Figura 2.70.** Representación de los puntos de iluminación del Auditorio.

## PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA

En los próximos apartados se expone la metodología seguida para lograr la caracterización acústica del piano de cola. El proceso llevado a cabo puede sintetizarse en dos grandes fases:

- Grabación de las muestras sonoras.
- Edición y análisis de las mismas.

### 2.4. Grabación de las muestras sonoras

#### 2.4.1. Consideraciones previas

Antes de abordar la grabación de las muestras sonoras se realizó un estudio previo de las características acústicas del piano que se querían analizar y se definieron los fragmentos musicales a interpretar y registrar.

Tras profundizar en la lectura de la documentación bibliográfica disponible sobre las particularidades sonoras del piano se eligen aquellos aspectos acústicos que resultan más interesantes de caracterizar entre los factibles de acometer teniendo en cuenta los medios limitados que se poseen. Finalmente se decide definir la caracterización en los siguientes 5 bloques de contenidos:

- Estudio de los armónicos.
- Efecto de la doble caída en las envolventes sonoras.
- Estudio de la dinámica.
- Resultado de la acción de los pedales.
- Estudio de la directividad del instrumento.

A continuación se seleccionó los eventos sonoros que se registrarían para poder analizar cada uno de los aspectos acústicos anteriormente enumerados. Se combina la interpretación de notas musicales independientes con la de pequeños fragmentos musicales. Estos últimos son parte de conocidas obras de la cultura clásica y popular y han sido interpretados según las partituras originales realizándoles las mínimas modificaciones posibles.

## 2.4.2. Piano de cola utilizado

### 2.4.2.1. Descripción

El instrumento musical empleado en las grabaciones sonoras es el **Steinway & Sons Model D**. Este piano de gran cola es uno de los estandartes mundiales de pianos de concierto. Se eligió este modelo en detrimento de los otros dos instrumentos disponibles para ser tocados en el Auditorio ya que este era el que poseía un mayor tamaño y una mejor calidad sonora.



Figura 2.71. Piano de cola Steinway & Sons Model D-274.

### 2.4.2.2. Emplazamiento en la sala

El piano se situó centrado en el escenario y cerca del borde del mismo. Para su colocación se tomó como referencia el lugar en el que normalmente se posiciona en los conciertos celebrados en este recinto ya que proporciona una buena radiación sonora del instrumento hacia las áreas de audiencia. Precisamente este fue el emplazamiento seleccionado para situar la fuente sonora (altavoz B&K 4224) en las medidas de la respuesta impulsiva del Auditorio que se realizaron *in situ*, así como en la simulación acústica del mismo en EASE (altavoz JBL MS115).



Figura 2.72. Situación del piano en el escenario del Auditorio.

### 2.4.3. Equipamiento necesario

#### 2.4.3.1. Toma microfónica

Para registro del sonido del piano se han usado dos configuraciones de audio diferentes. La primera de ellas es la más empleada y consiste en que la captación sea realizada con un único micrófono. Por otra parte, la segunda configuración, utilizada únicamente en el estudio de la directividad del instrumento, necesita de 6 micrófonos grabando simultáneamente un mismo evento sonoro cada uno desde una posición distinta.

##### 2.4.3.1.1. Configuración 1

Para recoger el sonido procedente del instrumento se utilizó un micrófono Brüel & Kjaer 4189.



Figura 2.73. Micrófono Brüel & Kjaer 4189.

##### ▪ Características del micrófono

El micrófono seleccionado cuenta con las siguientes especificaciones:

- **Respuesta en frecuencia:** 6,3 Hz – 20 KHz.  $\pm 1$  dB (10 Hz – 8 KHz).  $\pm 2$  dB 6,3 Hz – 20KHz.
- **Rango dinámico:** 14,6 – 146 dB.
- **Patrón polar de directividad:** es un micrófono omnidireccional.

##### ▪ Situación del micrófono

Teniendo en cuenta las propias características de radiación del piano de cola y que las tomas sonoras se efectuarán con un único micrófono, la captación deberá ser realizada desde la zona de máxima radiación del instrumento con el micrófono apuntando hacia la zona de cruce de las cuerdas del piano tal y como se muestra en la **figura 2.74**.



**Figura 2.74.** Patrón general de radiación sonora de un piano de cola.

El micrófono se ha colocado siguiendo las anteriores pautas a una altura aproximada de 1,20 m sobre el suelo del escenario.



**Figura 2.75.** Colocación del micrófono en la configuración 1.

Como se observa en la **figura 2.75**, el micrófono se encuentra muy próximo a la tabla armónica del piano. Esta colocación responde a la intención de que el sonido recogido sea eminentemente el directo producido por el instrumento, minimizando así la influencia del efecto reverberante de la sala en las tomas sonoras que se realicen.

### 2.4.3.1.2. Configuración 2: Estudio de la directividad

Para el estudio de la directividad fue necesario el empleo de un mayor número de micrófonos. Para lograr una captación simultánea de los eventos sonoros en distintas posiciones alrededor del instrumento se seleccionaron 6 unidades del mismo modelo de transductor, el **micrófono de condensador Behringer C-3**.



**Figura 2.76.** Micrófono de condensador Behringer C-3

En otros estudios realizados sobre la directividad de la radiación sonora de instrumentos musicales [18] se ha utilizado un único micrófono para la captación que va moviéndose a cada una de las distintas posiciones de medida. Esta metodología implica la repetición del fragmento musical a registrar tantas veces como puntos de medida haya.

Este procedimiento no se considera el más adecuado para abordar el análisis de la directividad ya que, por un lado, consume gran cantidad de tiempo, y por otro, resulta imposible interpretar de forma idéntica los eventos sonoros en cada una de las repeticiones de los mismos que habría que realizar. Por ello, en el presente Proyecto, se opta por grabar simultáneamente las muestras sonoras con las 6 unidades de micrófono disponibles. El hecho de no disponer de más cantidad de transductores iguales ha restringido a seis los puntos de medida, cada uno de ellos separados por un ángulo de 60°.

#### ▪ Características de los micrófonos

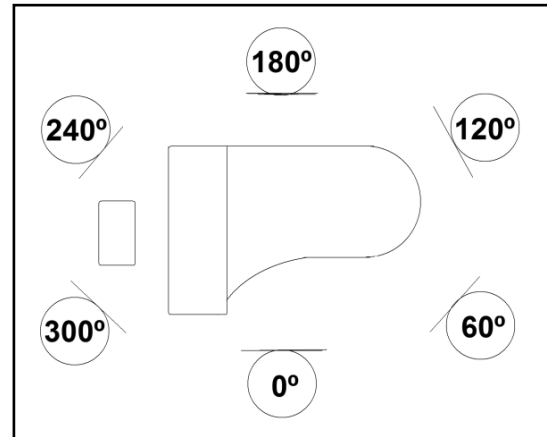
- **Respuesta en frecuencia:** 40Hz – 18 KHz. La respuesta no es completamente plana para todas las frecuencias aunque sus valores se encuentran dentro de unos niveles aceptables.
- **Rango dinámico:** 119 dB.
- **Patrón polar de directividad.** Permite 3 configuraciones diferentes: cardioide, bidireccional (en forma de 8) y omnidireccional. Para la presente caracterización se escogió el patrón polar cardioide con el objetivo de acotar la zona de recogida del sonido a la más próxima al instrumento.

### ▪ Situación de los micrófonos

Los micrófonos se ubicaron formando una circunferencia alrededor del piano, colocando cada uno de ellos en las siguientes posiciones: 0°, 60°, 120°, 180°, 240° y 300°.



**Figura 2.77.** Momento de la grabación empleando la configuración 2.



**Figura 2.78.** Posiciones de los micrófonos en la configuración 2.

Se situaron a unos 1,40 m respecto al nivel del suelo y a una distancia de separación del piano en el punto más cercano de la circunferencia de unos 50-60 cm.

Los micrófonos fueron rodados ligeramente de sus posiciones teóricas en forma de circunferencia perfecta con el objetivo que sus diafragmas no quedaran situados exactamente enfrente unos de otros y así, de este modo, minimizar el efecto de las cancelaciones que pudieran surgir entre ellos.

#### 2.5.1.1. Resto del equipamiento

A continuación se enumeran los demás elementos necesarios para llevar a cabo esta fase del Proyecto. Si se desea ampliar la información técnica de los mismos véase el **Pliego de condiciones**.



- **Ordenador de sobremesa iMac.** En él se instaló el *software* Protools LE 8, programa encargado de la grabación de las señales de audio.



Figura 2.79. Ordenador de sobremesa iMac.

- **Controlador DIGI 002 (*Mesa de mezclas de Protools*).** Posee 8 canales de entrada aunque únicamente 4 de ellos están preamplificados y disponen de entradas XLR de micrófonos y alimentación *Phantom*.



Figura 2.80. Controlador DIGI 002.

- **Previo de micrófonos Behringer Ultragain Pro MIC2200.** Empleado para preamplificar los micrófonos que sean necesarios.



Figura 2.81. Previo de micrófonos Behringer Ultragain Pro MIC2200.

- **Auriculares de estudio Sennheiser HD-203.** Al no disponer de una amplificación independiente de la ofrecida por los altavoces del ordenador se optó por utilizar auriculares para poder escuchar con mayores garantías los audios grabados.



**Figura 2.82.** Auriculares de estudio Sennheiser HD-203.

- **Cables y conectores.** Los dispositivos anteriores se interconectan a través de cable coaxial.
  - **6 cables de 8 m (XLR (hembra) - XLR (macho)).** Cuatro de ellos conectan los micrófonos con las entradas de audio de la mesa y dos de ellos unen los micrófonos a las entradas de audio del previo de micrófonos.
  - **2 cables de 1'5 m (Jack (macho) - Jack (macho)).** Enlazan las 2 salidas de audio del previo de micrófonos con la mesa DIGI 002.
  - **1 cable *firewire* de 6 pines de 2 m.** Une el ordenador iMac con mesa DIGI 002.

Tipos de conectores empleados:



**Figura 2.83.** Conectores. De izquierda a derecha: XLR (hembra, macho), Jack (macho) y firewire de 6 pines.

- **6 pies de micrófonos JB Systems (MS-21)**



**Figura 2.84.** Pie de micrófono JB Systems (MS-21)

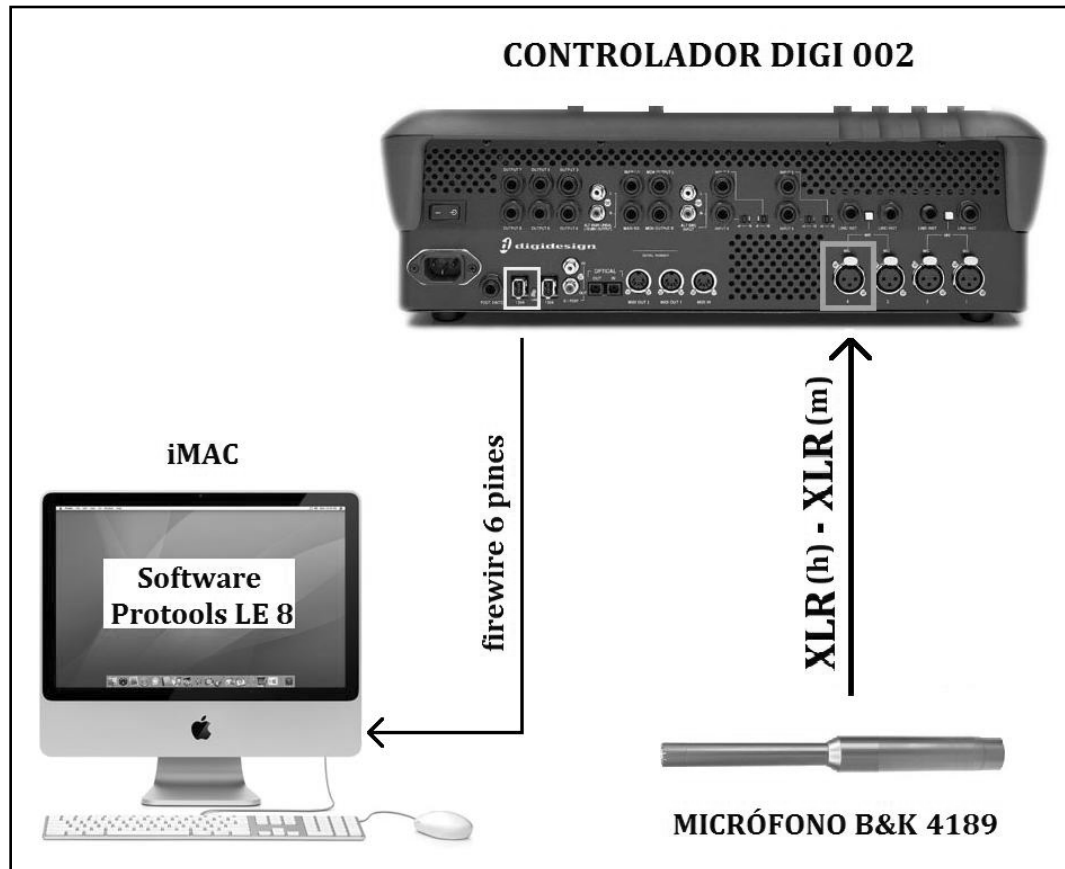
### 2.5.1.2. Conexionados

En la siguiente **figura 2.85** se muestra el puesto de trabajo usado durante el proceso de grabación.



**Figura 2.85.** Puesto de trabajo durante las grabaciones.

#### 2.5.1.2.1. Configuración 1



**Figura 2.86.** Conexionados correspondientes a la configuración 1 de grabación de audio.

## 2.5.1.2.2. Configuración 2

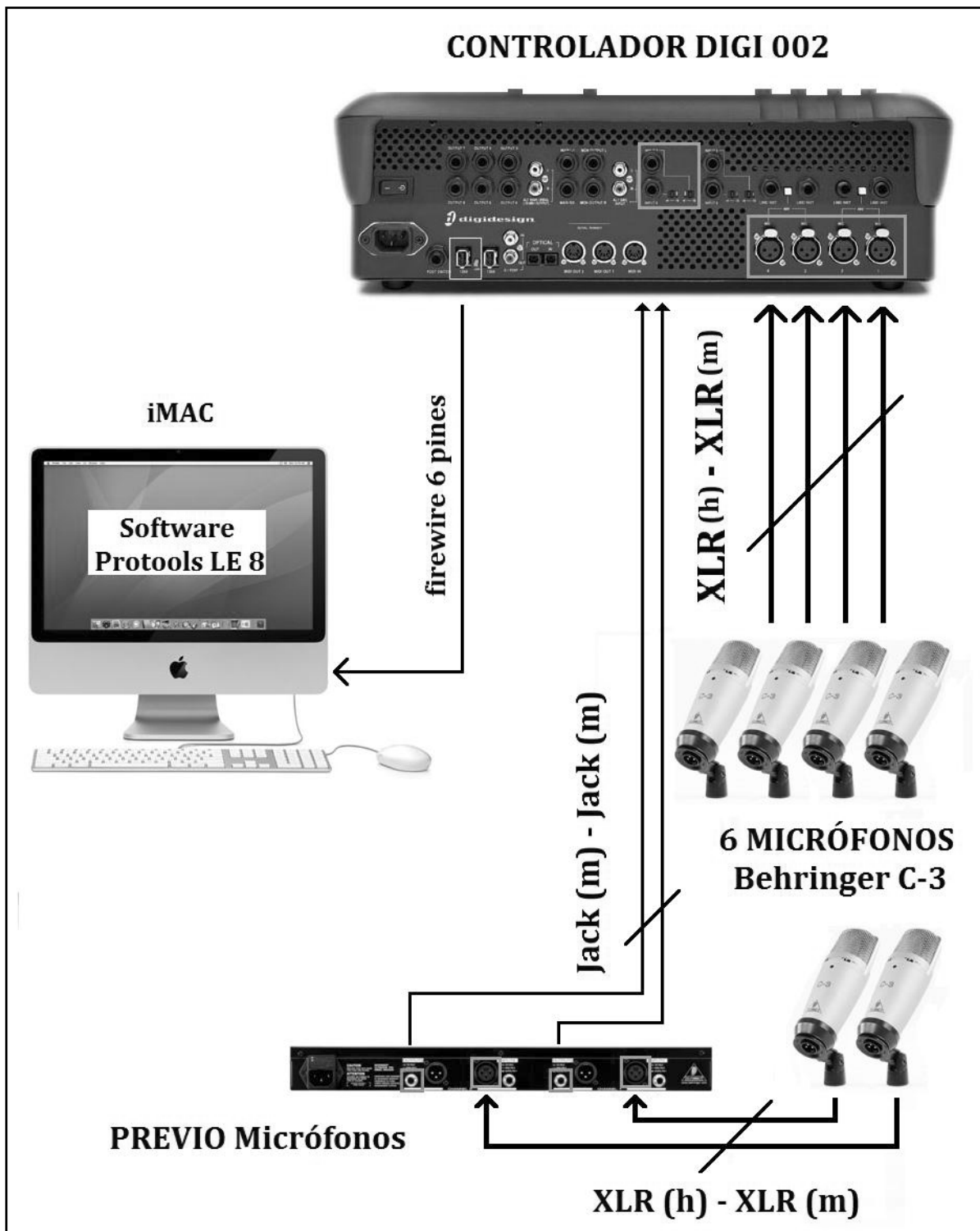


Figura 2.87. Conexiones correspondientes a la configuración 2 de grabación de audio.

## 2.5.2. Software empleado: Pro Tools®

### 2.5.2.1. Descripción

La realización de esta fase del Proyecto ha estado ligada a la utilización la plataforma de grabación, edición y mezcla multipista de audio y midi **Pro Tools® LE 8**.



**Figura 2.88.** Logotipo del *software* Pro Tools® LE.

Pro Tools® es una estación de trabajo de audio digital o EAD que integra *hardware* y *software* desarrollada por la empresa Avid Technology Inc., anteriormente bajo la denominación de DigiDesign. Esta plataforma es ampliamente considerada el estándar de grabación, edición y mezcla en estudios profesionales [19].



**Figura 2.89.** Pantalla de carga del *software* Pro Tools® LE 8.

El *hardware* consiste en la *interface* controladora Digi 002®.



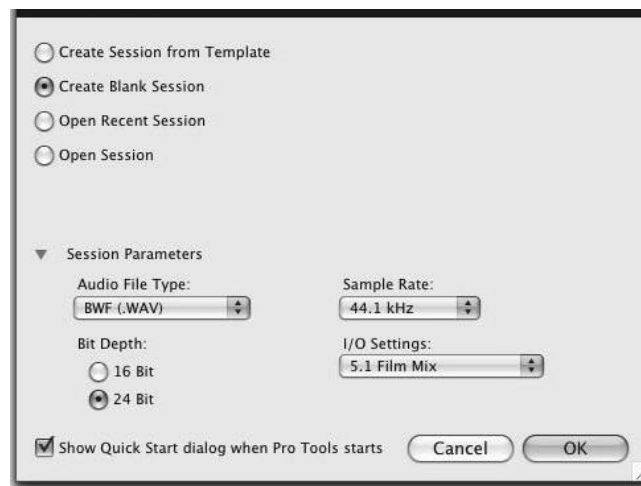
**Figura 2.90.** Controlador Digi 002®.

### 2.5.2.2. Grabación de audio

El programa posee multitud de funciones aunque en este Proyecto únicamente se ha utilizado para la grabación de audio.

#### ▪ Creación de una nueva sesión

Para empezar a trabajar con el *software* el primer paso es crear una nueva sesión, tal y como se muestra en la **figura 2.91**.



**Figura 2.91.** Creación y configuración de una nueva sesión en Pro Tools® LE 8.

En esta ventana se ajustan los parámetros que la caracterizarán. Estos son:

- *Audio File Type* (tipo de archivo de audio)
- *Bit Depth* (profundidad de bit)
- *Sampler Rate* (frecuencia de muestreo)

Para las sesiones de este Proyecto se han usado los siguientes valores:

- Archivos de audio: .wav, con el fin de garantizar una óptima compatibilidad entre las plataformas Mac y Windows®.
- Profundidad de bit: 24 bits.
- Frecuencia de muestreo: 48,0 kHz

#### ▪ Adición de pistas de audio

Cuando se emplea la configuración de audio 1, es decir, se dispone de un único micrófono para recoger las muestras sonoras del piano, sólo es necesaria la creación de una pista de audio en el *software*. Sin embargo, al abordar la grabación de las muestras sonoras relacionadas con

el estudio de la directividad del instrumento se aplica la configuración 2, y por tanto se deben crear 6 pistas de audio. En el presente Proyecto todas las pistas introducidas son monofónicas.



Figura 2.92. Creación de nuevas pistas de audio en Pro Tools® LE 8.



Figura 2.93. Apariencia de una pista de audio creada en Pro Tools® LE 8.

▪ **Asignación de las entradas y salidas**

Antes de poder iniciar una grabación se debe especificar las “rutas” de las señales de entrada y salida para el material que se vaya a grabar. Se establece para cada pista de audio de dónde va a obtener la fuente de sonido y por dónde se realizará el monitorizado de la grabación. Con la configuración de audio 1 únicamente se emplea el canal 1 de Digi 002® que se asigna como entrada de la pista 1 del programa. En la segunda configuración los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 6 de la mesa de control se asignan por este orden a las pistas 1, 2, 3, 4, 5, y 6 creadas en la aplicación.



Figura 2.94. Asignación de entrada a una pista de audio en Pro Tools® LE 8.

### ▪ Grabación

En primera instancia se seleccionan las pistas de audio donde se quiere grabar pulsando el botón *rec* en los controles de pista de cada de ellas (fig. 2.95). La captura de señal comienza al activar el botón *rec* en la ventana *Transport* (fig. 2.96).



Figura 2.95. Pista de audio habilitada para la grabación en Pro Tools® LE 8.



Figura 2.96. Ventana *Transport* en Pro Tools® LE 8.

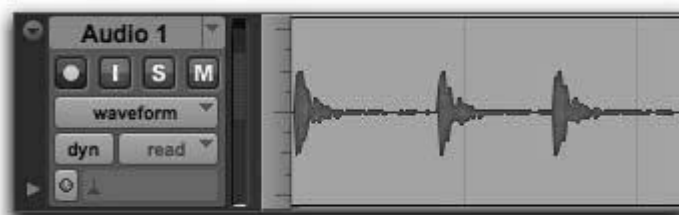


Figura 2.97. Apariencia de una pista de audio con material grabado en Pro Tools® LE 8.

Antes de iniciar las grabaciones definitivas hay que asegurarse que se dispone de un buen nivel de señal. Para ello, se pide al instrumentista que toque el piano a la máxima potencia sonora posible y, en función a este nivel se ajustan los controles de ganancia de los canales en uso en el controlador DIGI 002® y/o el previo de micrófonos. Observando los vúmetros de las distintas pistas del *software* Pro Tools se comprueba que se recibe el mayor nivel de señal posible sin que haya saturación.

Los audios grabados en cada sesión se guardan automáticamente en una carpeta del ordenador donde está instalado el *software*. Predefinidamente esta carpeta se denomina “*audio files*” (fig. 2.97).



Figura 2.98. Carpetas predefinidas del Pro Tools® LE 8.



## 2.6. Edición y análisis de las muestras sonoras

Tras haber registrado los eventos sonoros del piano de cola se aborda la segunda fase del estudio: la edición y análisis de las muestras.

### 2.6.1. *Software* empleado

La ejecución de esta fase del Proyecto ha estado ligada a la utilización de las siguientes aplicaciones informáticas:



**Figura 2.99.** Logos de los programas usados. De izquierda a derecha: Sound Forge™ Pro 11.0, Audacity® 2.0.6, Adobe Audition® CC 2014, Multi-Instrument® 3.4 y Microsoft Office Excel 2007.

#### 2.6.1.1. Sound Forge™ Pro 11.0

##### 2.6.1.1.1. Descripción

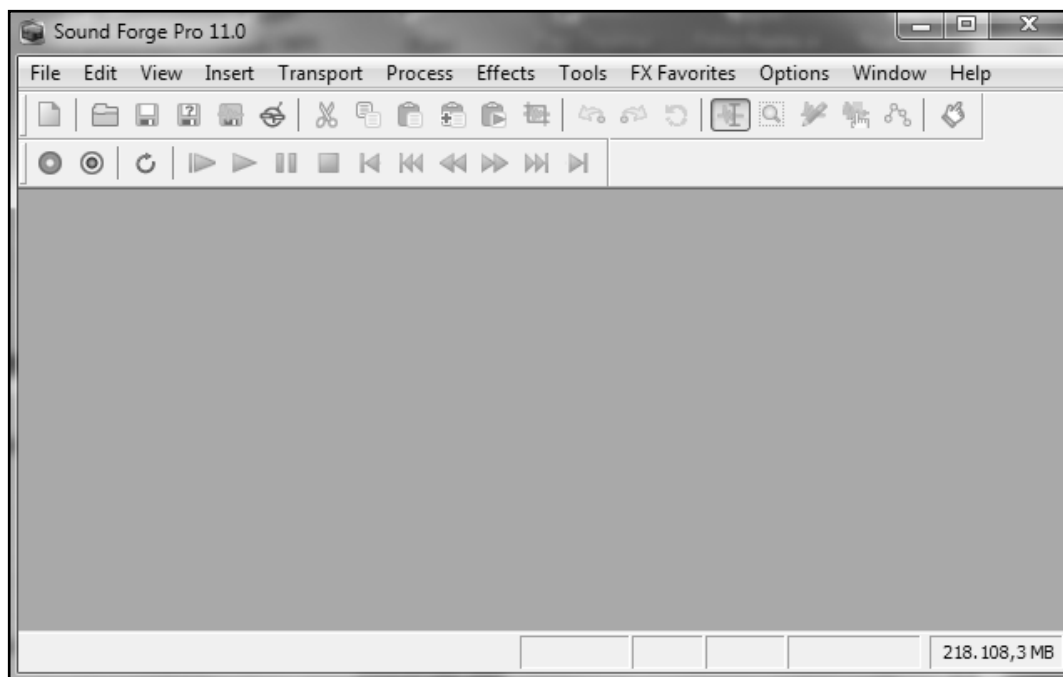
El *software* Sound Forge™ Pro 11.0, desarrollado y distribuido por Sony Creative Software Inc., está disponible para los sistemas operativos Windows® y Mac® OS X. Integra un conjunto de potentes herramientas para la grabación y masterización de audio profesional, diseño de sonido, restauración de audio y creación de CD estándar. Además proporciona una edición precisa basada en eventos, un procesamiento de archivos de instrumentos musicales y una conversión de audio y extensión de tiempo de gran calidad [20].



**Figura 2.100.** Pantalla de carga del *software* Sound Forge™ Pro 11.0.

A continuación se detallan sus especificaciones y funciones más relevantes:

- Formatos y frecuencias de muestreo
  - Admite archivos de punto flotante de 24 y 32/64 bits a 192 kHz de resolución.
  - Importa y exporta prácticamente cualquier extensión de archivo de audio.
  - Conversión de frecuencias de muestreo y formatos.
- Grabación de audio
  - Grabación de audio en directo desde micrófono, entrada de línea y otros.
  - Captura del sonido que se reproduce en el ordenador.
  - Uso de temporizador de grabación.
  - Grabación de archivos de audio multicanal.
- Edición y mezcla
  - Permite la edición de archivos de audio mono, estéreo y multicanal (hasta 32 canales).
- Diseño y masterización de sonido
- Procesamiento de efectos
- Análisis acústico
  - Visualización de las formas de onda, los espectros frecuenciales y los espectrogramas de los audios importados o grabados.
- Audio para vídeo
  - Es compatible con varios formatos de vídeo (.avi, wmv, .mpeg1 y .mpeg2).
  - Sincronización de audio y vídeo de forma precisa fotograma a fotograma.



**Figura 2.101.** Ventana principal del *software* Sound Forge™ Pro 11.0.

### 2.6.1.1.2. Edición de las muestras sonoras

A pesar de las numerosas herramientas que ofrece, esta aplicación informática se ha empleado exclusivamente durante el proceso de edición de audio. Los archivos sonoros guardados automáticamente por el *software* Pro Tools en el transcurso de la grabación del piano de cola suelen ser de gran duración. Por ello, antes de abordar su análisis, se extraen las muestras válidas y se guardan como archivos de audio individuales para posteriormente poder afrontar su estudio con mayor facilidad.

- **Importación de audio**

Siguiendo la ruta: File – Open, se selecciona el archivo de audio que se desee editar y este aparece en pantalla.

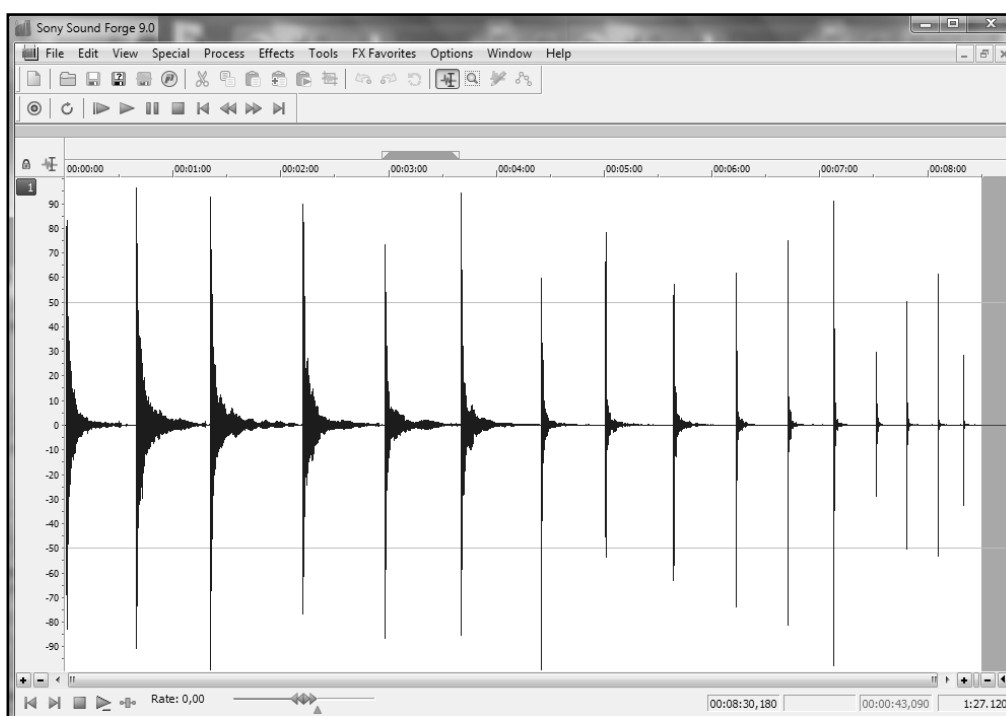
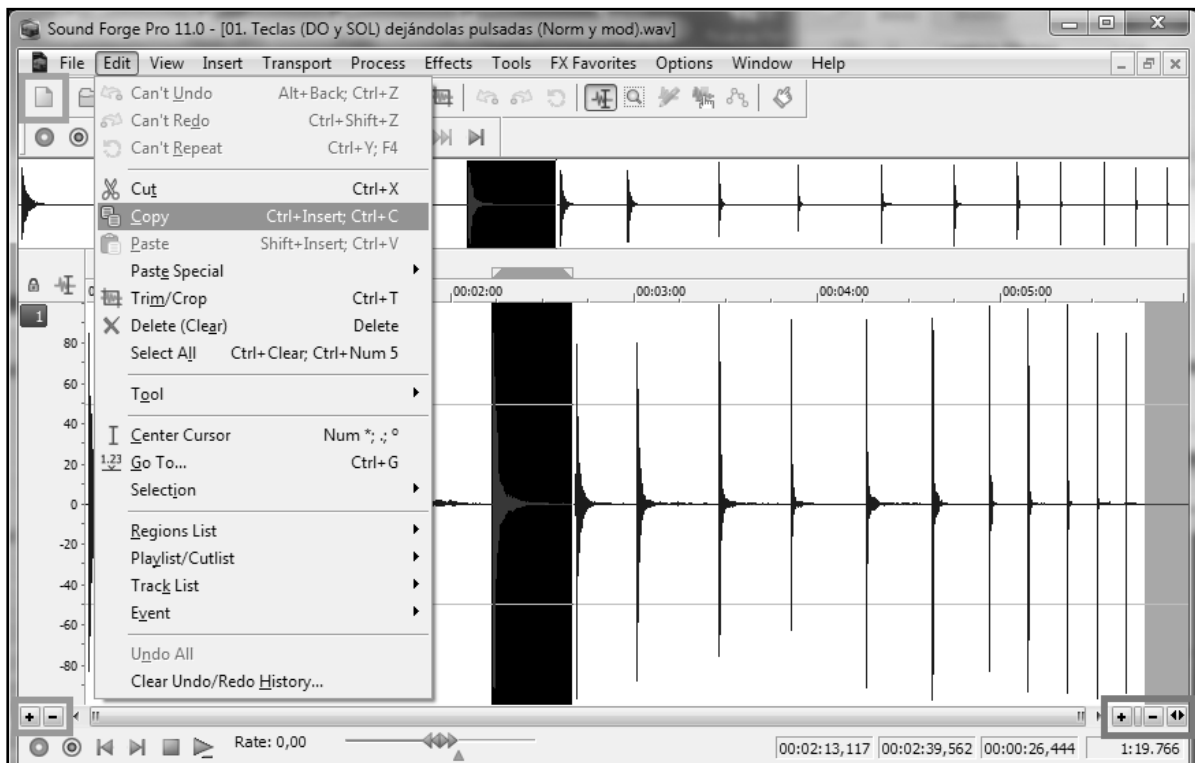


Figura 2.102. Archivo de audio presentado en pantalla en el *software* Sound Forge™ Pro 11.0.

- **Edición y guardado**

Tras seleccionar el fragmento de audio a editar se utilizan fundamentalmente las funciones disponibles en el menú *Edit*: cortar, copiar, pegar, etc. Si es necesario se crea un nuevo documento donde poder pegar la muestra sonora extraída. Finalmente, una vez realizadas las modificaciones pertinentes se guarda el nuevo audio.



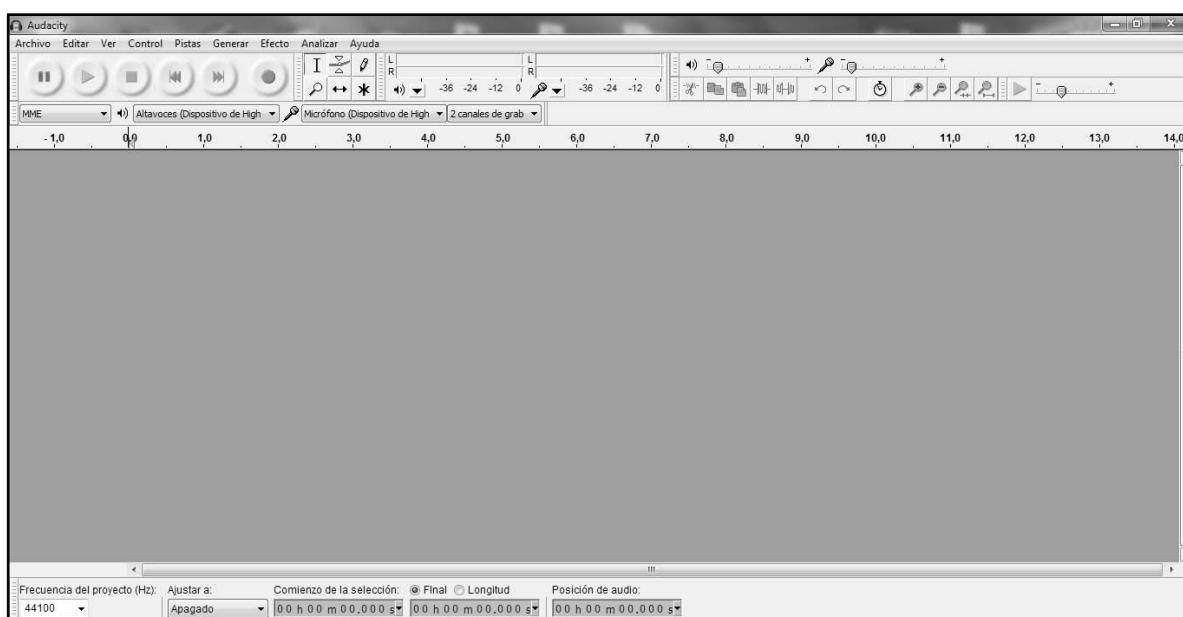
**Figura 2.103.** Selección del trozo de muestra sonora a editar (sombreado negro). Herramientas de edición (menú *Edit*), opción de crear un nuevo documento (recuadro naranja) y herramientas de zoom vertical (recuadro verde) y horizontal (recuadro rojo) del *software* Sound Forge™ Pro 11.0.

## 2.6.1.2. Audacity® 2.0.6

### 2.6.1.2.1. Descripción

Audacity® es un editor multipista de audio y grabador para Windows®, Mac® OS X y GNU/Linux®. Es un *software* libre, de código abierto desarrollado por un grupo de voluntarios y distribuido bajo la Licencia Pública General de GNU (GPL). Entre sus funciones y especificaciones destacan las siguientes [21]:

- Formatos y frecuencias de muestreo
  - Importa y exporta archivos .wav, .aiff, .flac, .mp2, .mp3, .ac3, .m4a/.m4r (.aac), .wma y Ogg Vorbis, entre otros.
  - Grabación y edición de muestras de 16, 24 y 32 bits.
  - Conversión de gran calidad de frecuencias de muestreo y formatos
- Grabación de audio
  - Grabación de audio en directo desde micrófono, entrada de línea y otros.
  - Captura del sonido que se reproduce en el ordenador.
  - Grabación simultánea de canales múltiples (teniendo el *hardware* apropiado).
- Edición y mezcla
- Procesamiento de efectos
- Análisis acústic
  - Visualización de las formas de onda, los espectros frecuenciales y los espectrogramas de los audios importados o grabados.



**Figura 2.104.** Ventana principal del *software* Audacity® 2.0.6.

### 2.6.1.2.2. Visualización de formas de ondas y espectrogramas

Este *software* se ha utilizado fundamentalmente para la representación temporal y frecuencial de las muestras sonoras.

#### ▪ Importación de audio

Al ser un editor multipistas permite la importación de varios archivos de audio a la vez.

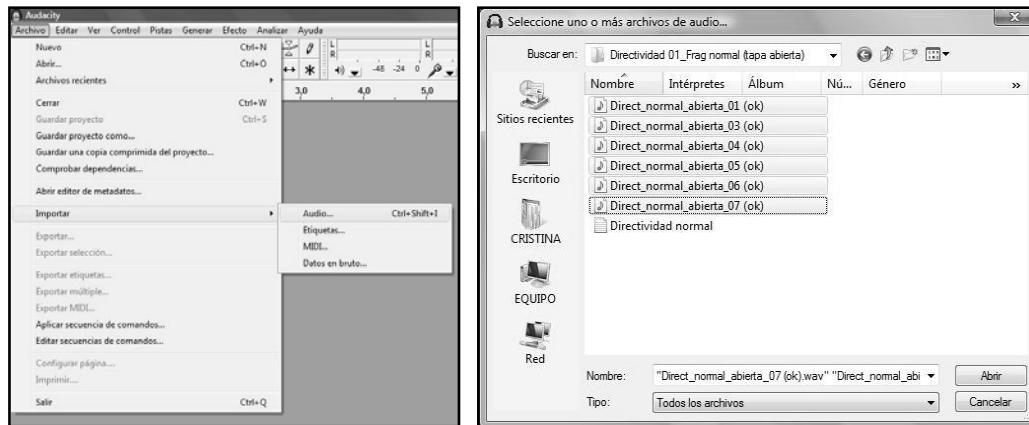


Figura 2.105. Importación de audios en Audacity® 2.0.6.

#### ▪ Configuración y visualización de formas de onda

En la **figura 2.106** se muestra la visualización simultánea de las formas de onda de 6 audios diferentes. De esta manera la aplicación proporciona una rápida comparación visual entre distintas muestras sonoras, característica que será útil especialmente al abordar el estudio de la directividad del piano de cola.

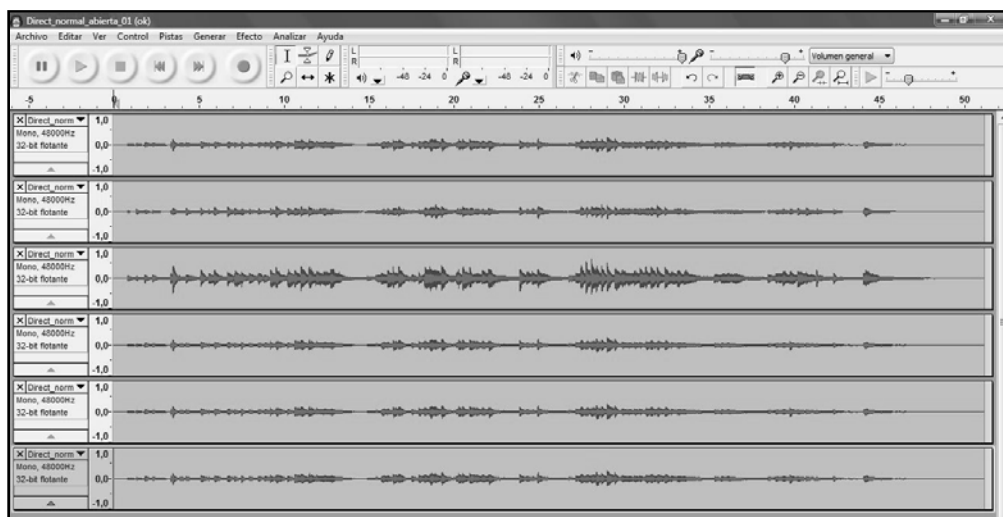
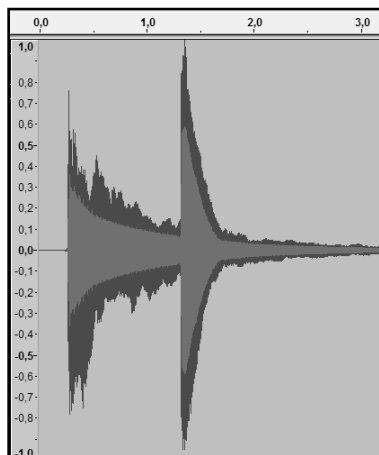


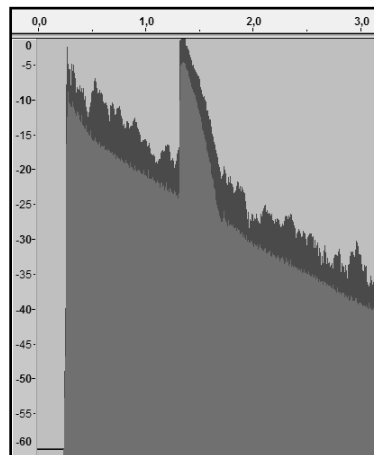
Figura 2.106. Visualización de las formas de onda de 6 audios en Audacity® 2.0.6.

El programa brinda la alternativa de representar la forma de onda con el eje X en forma lineal o bien en dB. Por defecto los niveles de amplitud presentados son relativos, es decir, el

mayor pico sonoro existente en la muestra sonora se considera 1,0 en la representación lineal (**fig. 2.107**) y 0 dB en la otra opción (**fig. 2.108**).



**Figura 2.107.** Forma de onda (lineal) en Audacity®.

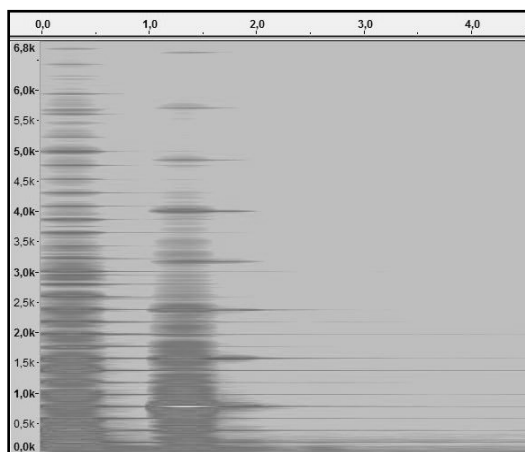


**Figura 2.108.** Forma de onda (dB) en Audacity®.

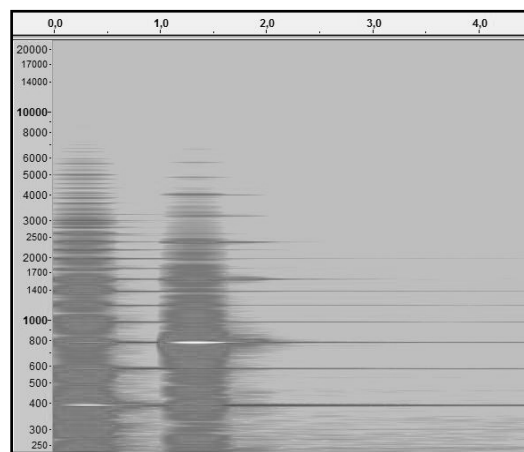
▪ **Visualización de espectrogramas**

Las opciones de configuración del análisis espectral y su representación en pantalla son más limitadas que las ofrecidas por otros programas como el Adobe Audition® CC 2104. No obstante, dispone de las siguientes herramientas:

- Herramienta zoom: tanto del eje X (tiempo) como del eje Y (frecuencia).
- Representación lineal (**fig. 2.109**) o logarítmica (**fig. 2.110**). A pesar de la posibilidad de disponer el eje X de manera logarítmica, la aplicación no toma como frecuencias guías los centros de bandas de octavas según un criterio acústico ( $1000 \cdot 2^n$ ) o musical ( $440 \cdot 2^n$ ), sino que usa la expresión:  $10^n$ . Por ello, cuando es necesario realizar un análisis detallado del espectrograma de una muestra sonora se emplea el *software* Adobe Audition®.



**Figura 2.109.** Espectrograma (lineal) en Audacity®.



**Figura 2.110.** Espectrograma (logarítmico) en Audacity®.

## 2.6.1.3. Adobe Audition® CC 2014

### 2.6.1.3.1. Descripción

Adobe Audition® Creative Cloud 2014 es un potente programa de edición de sonido diseñado para acelerar los flujos de trabajo de la producción de audio y vídeo y ofrecer los más elevados estándares de calidad de sonido. Comprende un completo conjunto de herramientas para grabar, editar y crear contenido de audio además de incluir funciones de forma de onda, visualización espectral y multipista. Está disponible para los sistemas operativos Microsoft Windows® y Mac® OS X [22].

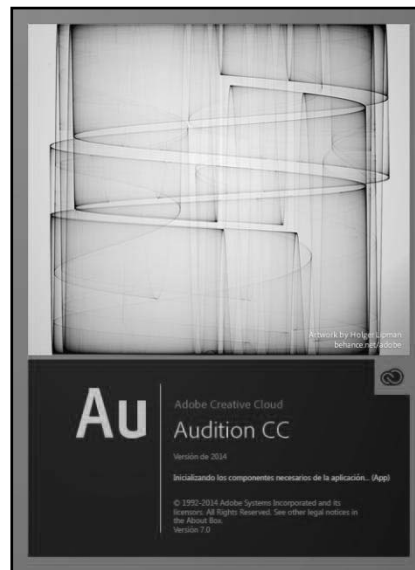


Figura 2.111. Pantalla de carga del *software* Adobe Audition® CC 2014.

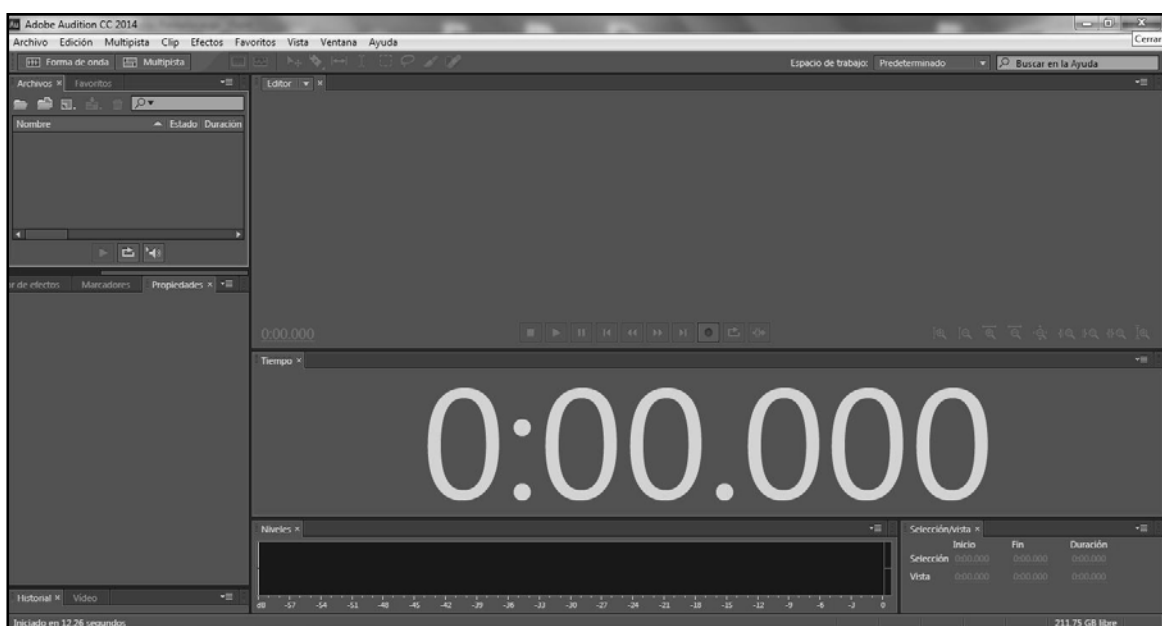


Figura 2.112. Ventana principal del programa Adobe Audition® CC 2014.

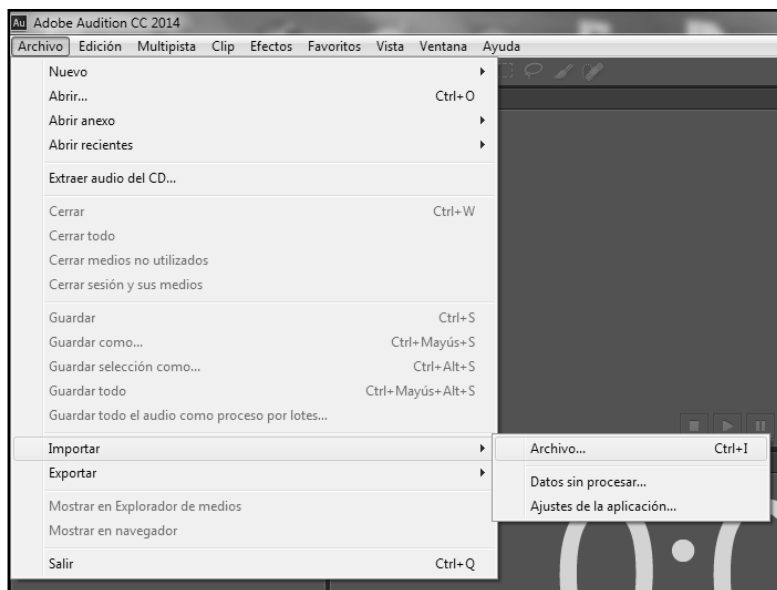


### 2.6.1.3.2. Visualización de espectrogramas

En el presente Proyecto esta aplicación informática se ha empleado exclusivamente para la representación de espectrogramas.

- **Importación de audio**

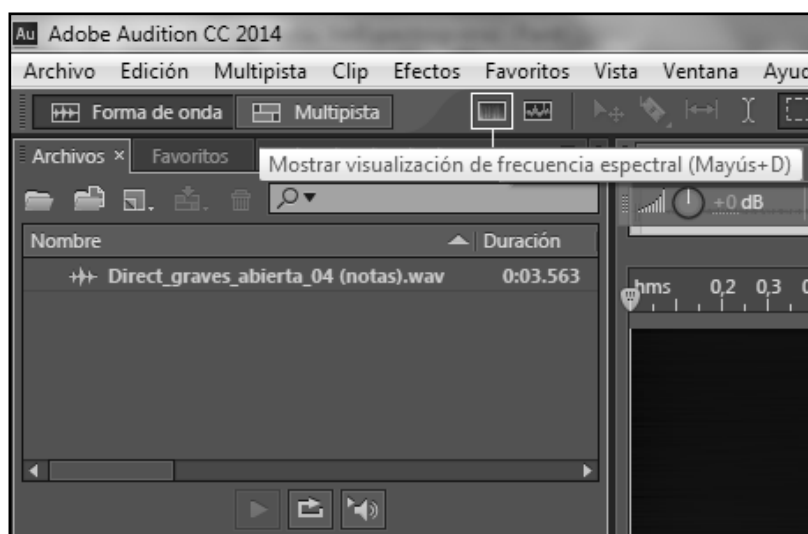
El primer paso a realizar es abrir las muestras sonoras que se desean analizar, tal y como se expone en la **figura 2.113**.



**Figura 2.113.** Importación de audios en Adobe Audition® CC 2014.

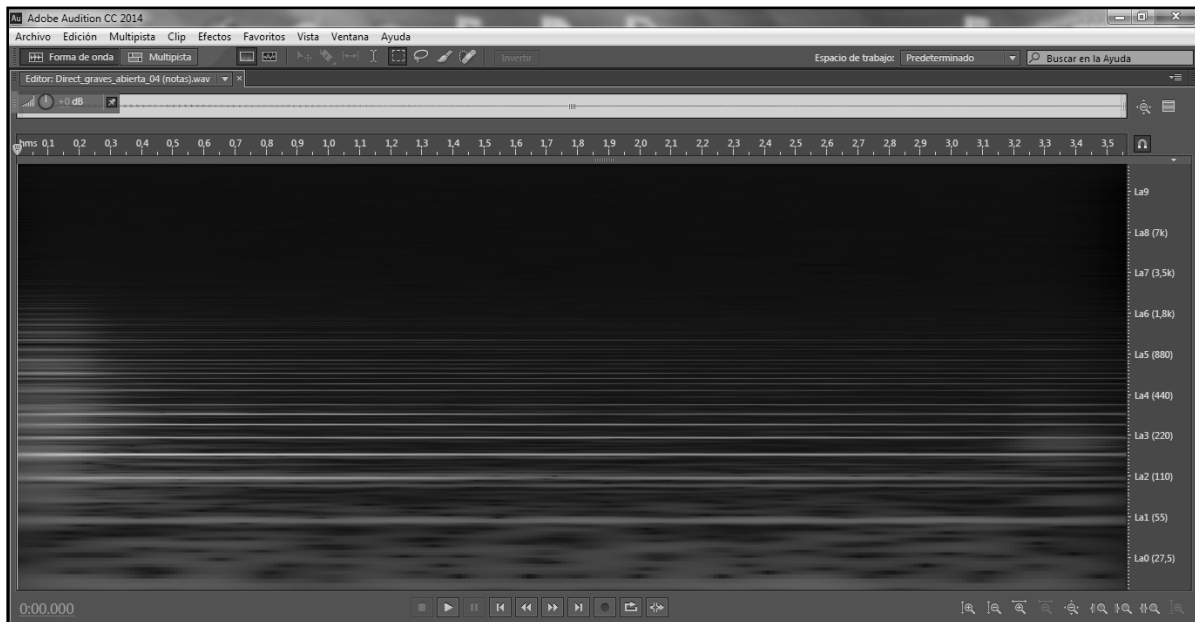
- **Configuración y visualización de espectrogramas**

Una vez seleccionado el evento sonoro a estudiar se indica al programa que muestre en pantalla la visualización de la frecuencia espectral (espectrograma) de dicho audio.



**Figura 2.114.** Selección de la visualización del espectrograma del audio seleccionado.

El resultado mostrado será similar al recogido en la **figura 2.115**. En la representación espectral la aplicación emplea una escala de colores que oscila entre el amarillo y el negro, indicando el máximo nivel sonoro y la ausencia de sonido respectivamente.



**Figura 2.115.** Ejemplo de espectrograma obtenido con el Adobe Audition® CC 2014.

El *software* permite configurar varias características del análisis espectral a realizar y su visualización en pantalla. Entre ellas, destacan:

- Herramienta zoom: tanto del eje X (tiempo) como del eje Y (frecuencia).
- Visualización del eje de frecuencias en Hercios o en notas musicales.
- Representación logarítmica o lineal.
- Ajuste de la resolución espectral.



**Figura 2.116.** Ventana de configuración de la representación espectral.

### 2.6.1.4. Multi-Instrument® 3.4

#### 2.6.1.4.1. Descripción

El *software* Multi-Instrument® 3.4 desarrollado por VIRTINS® ofrece un paquete de equipos virtuales de medición electrónica entre los que se encuentran [23]:

- *Oscilloscope*: Osciloscopio (2 canales)
- *Spectrum Analyzer*: Analizador de espectros (2 canales)
- *Signal Generator*: Generador de señales (2 canales)
- *Multimeter*; Polímetro (2 canales)
- *LCR Meter*: Medidor de impedancias, inductancias, capacitancias y resistencias.
- *Spectrum 3D Plot* (2 canales)
- *Data Logger* (2 canales)
- *Device Test Plan*
- *Derived Data Point Viewer*

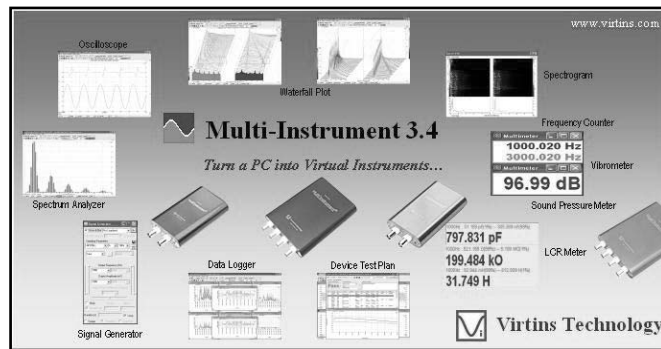


Figura 2.117. Pantalla de carga de Multi-Instrument® 3.4.

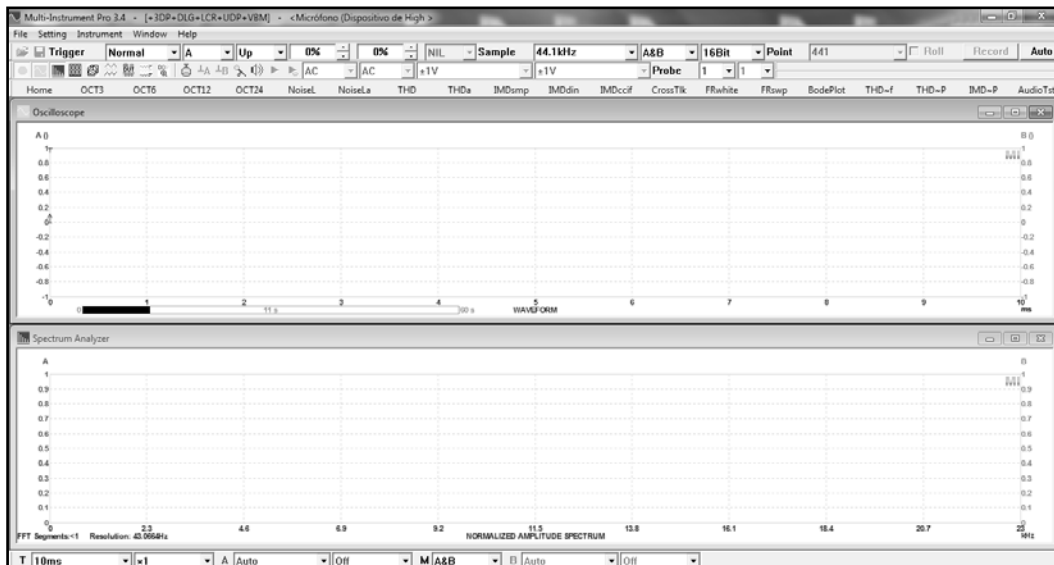


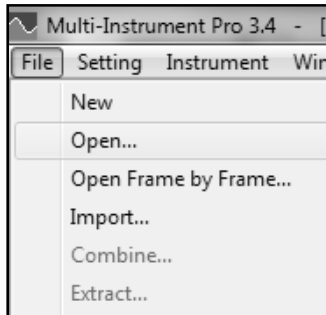
Figura 2.118. Ventana principal de Multi-Instrument® 3.4.

### 2.6.1.4.2. Análisis del espectro frecuencial

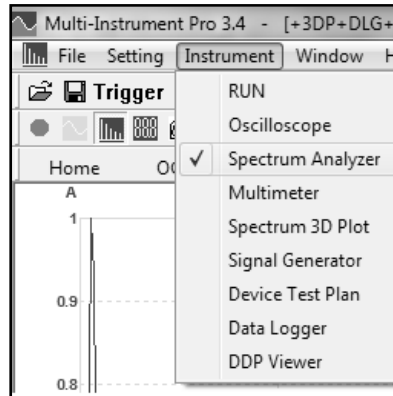
En la elaboración de este Proyecto únicamente se ha utilizado la función *Amplitude Spectrum* (amplitud de espectro) del instrumento *Spectrum Analyzer* (analizador de espectros).

#### ▪ Configuración del analizador de espectros

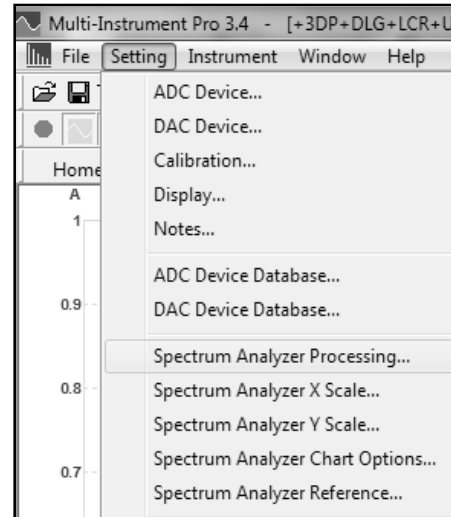
Una vez abierto el archivo de audio que se quiere estudiar (**fig. 2.1189**), se escoge el instrumento (**fig. 2.120**) y se accede a su configuración (**fig. 2.121**).



**Figura 2.119.** Apertura de un archivo de audio.

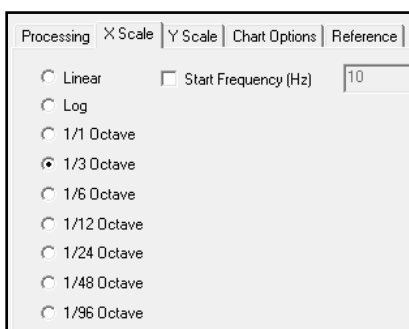


**Figura 2.120.** Elección del instrumento.

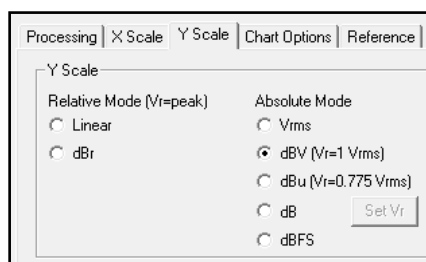


**Figura 2.121.** Selección de las propiedades del analizador de espectro.

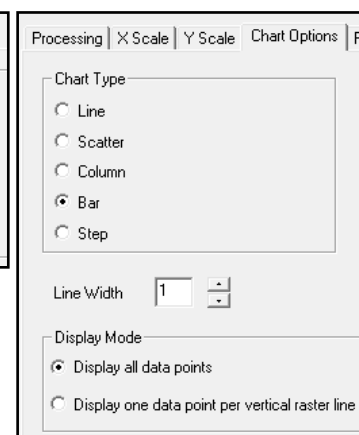
El analizador de espectros ofrece diferentes posibilidades de configuración, tal y como se muestra en las **figuras 2.122, 2.123 y 2.124**.



**Figura 2.122.** Configuración del eje X del analizador de espectros.



**Figura 2.123.** Configuración del eje Y del analizador de espectros.



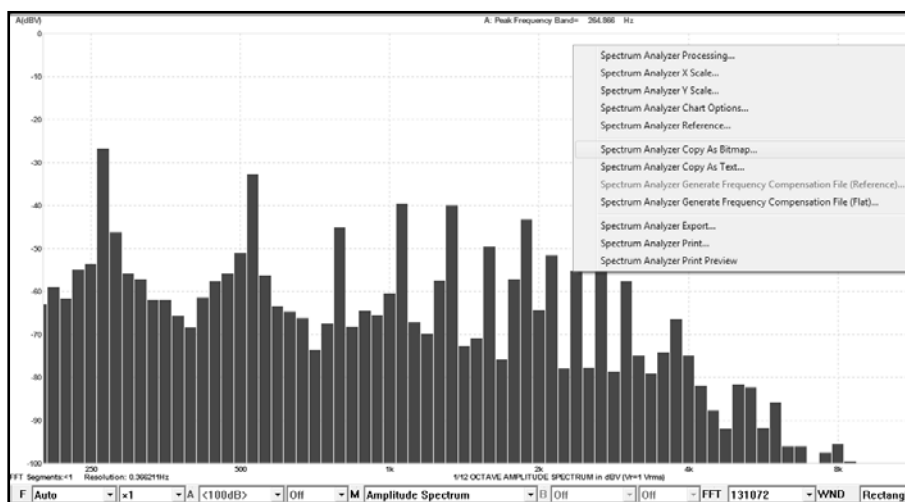
**Figura 2.124.** Configuración de la visualización gráfica del analizador de espectros.

La configuración que ha sido usada en el presente Proyecto es la siguiente:

- **Eje de abscisas (X):** en tercios de octava (1/3 oct.) y doceavos de oct. (1/12 oct.).
  - ✓ **Frecuencia de inicio:** según las características propias de cada archivo de audio el análisis se programó en diferentes frecuencias de inicio.
- **Eje de ordenadas (Y):** en dBV ( $V_r = 1 V_{rms}$ ).
- **Visualización gráfica:** barras.

▪ **Exportación de datos**

Una vez seleccionadas las anteriores especificaciones aparecerá en la pantalla una gráfica de características similares a la expuesta en la **figura 2.125**.



**Figura 2.125.** Visualización gráfica del analizador de espectros. Opciones de exportación.

Pulsando con el botón derecho del ratón sobre la representación se puede acceder a varias funciones, entre las que destacan.

- ***Spectrum analyzer copy as bitmap:*** exportar la visualización gráfica del analizador de espectro como un archivo de imagen *bitmap*.
- ***Spectrum analyzer copy as text:*** exportar en formato de texto (.txt) los valores de las medidas llevadas a cabo (**figura 2.125**).

```

;Octave RMS Amplitude Spectrum
;Sampling Frequency (Hz) = 48000
;Sampling Bit Resolution (Bits) = 16
;Total Data Points = 51646
;FFT Size = 131072
;No., Frequency (Hz), channel A (v)
1, 11.6376, 5.20234e-005
2, 12.3134, 5.19423e-005
3, 13.0285, 5.84445e-005
4, 13.7851, 2.83599e-005
5, 14.5857, 4.15451e-005
6, 15.4327, 7.06118e-005
7, 16.3289, 0.000147942
8, 17.2772, 6.42555e-005
9, 18.2806, 5.58802e-005
10, 19.3422, 5.80774e-005
    
```

**Figura 2.126.** Fragmento del documento .txt exportado de Multi-Instrument®.

### 3.3.1.5. Microsoft Office Excel

#### 3.3.1.5.1. Descripción

Microsoft Office Excel es una aplicación de hojas de cálculo desarrollada y distribuida por Microsoft e incluida dentro la suite ofimática Microsoft Office. Está disponible para los sistemas operativos Microsoft Windows® y Mac® OS X. Permite analizar, organizar y administrar datos y listas y realizar representaciones visuales de los mismos en distintos formatos de gráficas y diagramas.

#### 3.3.1.5.2. Elaboración de tablas y gráficos

- **Conversión de unidad de medida: de V a dBV**

Antes de iniciar el análisis de los datos aportados por el *software* Multi-Instrument®, se convierte la unidad de medida con la que se expresa la amplitud o nivel de los eventos sonoros. Como se observa en la **figura 2.127**, Multi-Instrument® exporta los valores en V (voltios). Sin embargo, no se considera esta magnitud la idónea para abordar un estudio acústico, así que se transforma en dBV empleando la siguiente ecuación:

$$dBV = 20 \times \log \frac{V}{V_0}, \text{ considerando } V_0 = 1 V$$

Do4 (ff)			
Frecuencia (Hz)	Nivel (dBV)	log (V)	Nivel (V)
125	-40,0	-2,00066411	0,00998472
160	-50,6	-2,52879780	0,00295939
200	-46,6	-2,32854389	0,00469306
250	-18,5	-0,92375654	0,119191
315	-39,5	-1,97464497	0,0106012
400	-48,1	-2,40250995	0,00395813
500	-24,1	-1,20400257	0,0625169
630	-48,0	-2,40002964	0,0039808
800	-36,7	-1,83388973	0,0146592
1000	-29,8	-1,48884687	0,0324454
1250	-31,2	-1,56052204	0,0275092
1600	-39,3	-1,96574464	0,0108207
2000	-33,1	-1,65726750	0,0220157
2500	-37,6	-1,88089264	0,0131555
3150	-44,1	-2,20598485	0,00622322
4000	-48,5	-2,42283002	0,0037772
5000	-59,0	-2,95093711	0,0011196
6300	-59,2	-2,95963900	0,00109739
8000	-69,6	-3,47952171	0,000331496
10000	-74,1	-3,70483330	0,000197318
12500	-74,7	-3,73601380	0,000183648

**Figura 2.127.** Niveles de las bandas de 1/3 de octava correspondientes a una nota Do4 tocada en ff.

▪ **Elaboración de tablas**

Los datos obtenidos de los niveles en dBV de las distintas bandas de frecuencia se presentan en distintas tablas, como la mostrada a continuación:

Comparativa: Nota Do4 en diferentes dinámicas				
Frecuencia (Hz)	Niveles (dBV)			
Do 4 = 261,6 Hz	<i>ff</i>	<i>mf-f</i>	<i>p-mp</i>	<i>pp</i>
125	-40,0	-54,8	-65,5	-74,6
160	-50,6	-62,7	-71,1	-78,2
200	-46,6	-55,5	-61,8	-69,2
250	-18,5	-26,9	-35,6	-41,0
315	-39,5	-50,2	-57,6	-61,5
400	-48,1	-56,4	-63,8	-68,3
500	-24,1	-32,8	-42,8	-54,9
630	-48,0	-58,1	-66,7	-74,9
800	-36,7	-45,1	-53,6	-53,2
1000	-29,8	-39,6	-50,9	-66,3
1250	-31,2	-40,0	-51,8	-61,7
1600	-39,3	-49,5	-59,5	-65,9
2000	-33,1	-42,5	-56,8	-62,7
2500	-37,6	-50,9	-73,7	-82,6
3150	-44,1	-57,5	-76,0	-85,3
4000	-48,5	-65,7	-83,8	-89,1
5000	-59,0	-78,2	-86,4	-90,5
6300	-59,2	-84,9	-87,2	-91,1
8000	-69,6	-92,0	-88,1	-91,7
10000	-74,1	-96,4	-89,0	-92,4
12500	-74,7	-96,8	-89,3	-92,8

Figura 2.128. Comparativa de los niveles de las bandas de 1/3 de octava correspondientes a una nota Do4 tocada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

▪ **Confección de gráficos**

Finalmente, a partir de las tablas confeccionadas se diseñan diferentes representaciones gráficas de los resultados (figura 2.129).

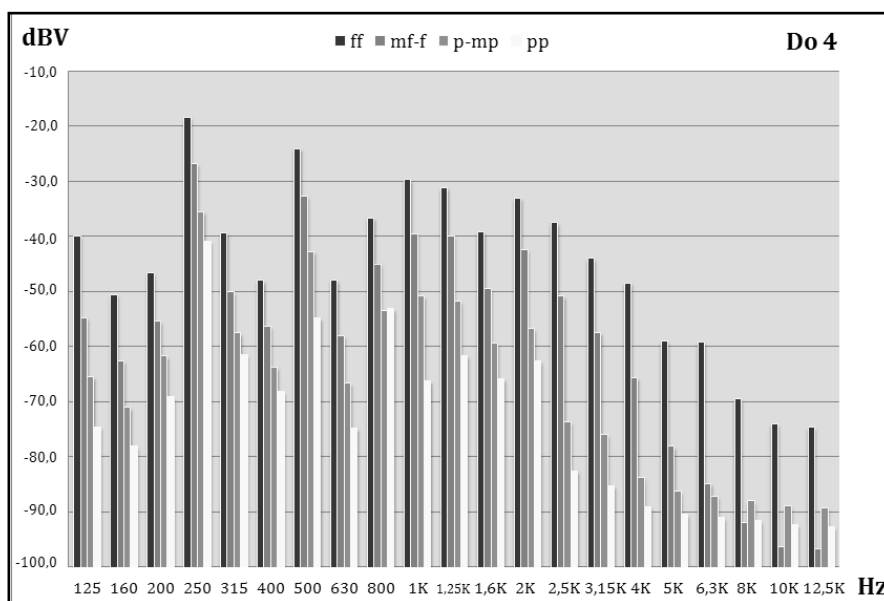


Figura 2.129. Gráfica de la comparativa de niveles de una nota Do4 tocada con diferentes matices.





# Capítulo 3: Resultados

---

## PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en las medidas *in situ* de la respuesta impulsiva del Auditorio así como en la simulación acústica del mismo realizada mediante el *software* EASE.

A la hora de analizar acústicamente un recinto hay que tener en cuenta el grado de ocupación que presenta, es decir, si hay o no público presente en él. En este Proyecto la medición presencial se efectuó con el Auditorio vacío. No obstante, en la simulación acústica se decidió incorporar oyentes, para así poder estudiar también el comportamiento del espacio bajo la condición de sala ocupada. Esto permite la comparación de resultados y el análisis de las diferencias existentes entre ambos escenarios.

### 4.1. Cálculo del tiempo de reverberación medio del Auditorio

Una vez obtenidos los resultados de las medidas realizadas en el Auditorio mediante el programa Dirac, se deduce el tiempo de reverberación del mismo. El valor de  $T_{30}$  calculado será el que se empleará posteriormente en la configuración de la simulación acústica en EASE.

Como las mediciones se efectuaron con tres métodos de medida diferentes hay que realizar una serie de operaciones matemáticas para lograr un único valor. El procedimiento seguido se detalla a continuación, presentándose los resultados en la **tabla 3.1**.

- Se ejecuta la media aritmética del tiempo de reverberación entre todas las posiciones de medida para cada una de las frecuencias de cada uno de los métodos.
- Después, se calcula el tiempo de reverberación medio ( $TR_{mid}$ ) de los modos MLS Interno, MLS Externo e Impulso Externo. El  $TR_{mid}$  se obtiene realizando la media aritmética de los valores correspondientes a 500 Hz y 1 KHz.
- Finalmente, se efectúa la media aritmética de los tres valores de  $TR_{mid}$  obtenidos. El valor resultante se aproxima a **1,3 segundos**.

$T_{30}$ [s]	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz	$TR_{mid}$
<b>Media MLS INTERNO</b>	0,545	0,806	1,125	1,359	1,410	1,501	1,286	1,069	1,385
<b>Media MLS EXTERNO</b>	0,227	0,732	1,000	1,100	1,074	1,239	1,138	1,440	1,087
<b>Media IMPULSO Externo</b>	0,027	0,627	1,141	1,357	1,488	1,659	1,482	1,134	1,425
<b>Media de los valores de <math>TR_{mid}</math> =</b>									<b>1,299</b>

**Tabla 3.1.** Cálculo del tiempo de reverberación del Auditorio.

Observando los valores expuestos en la **tabla 3.2** se concluye que el Auditorio posee un tiempo de reverberación adecuado teniendo en cuenta la diversidad actos que alberga. Asimismo, el  $TR_{mid}$  obtenido es apropiado para su uso más frecuente: sala de conciertos (música de cámara). No obstante, hay que tener en cuenta que los valores presentados en la tabla son en condiciones de sala ocupada.

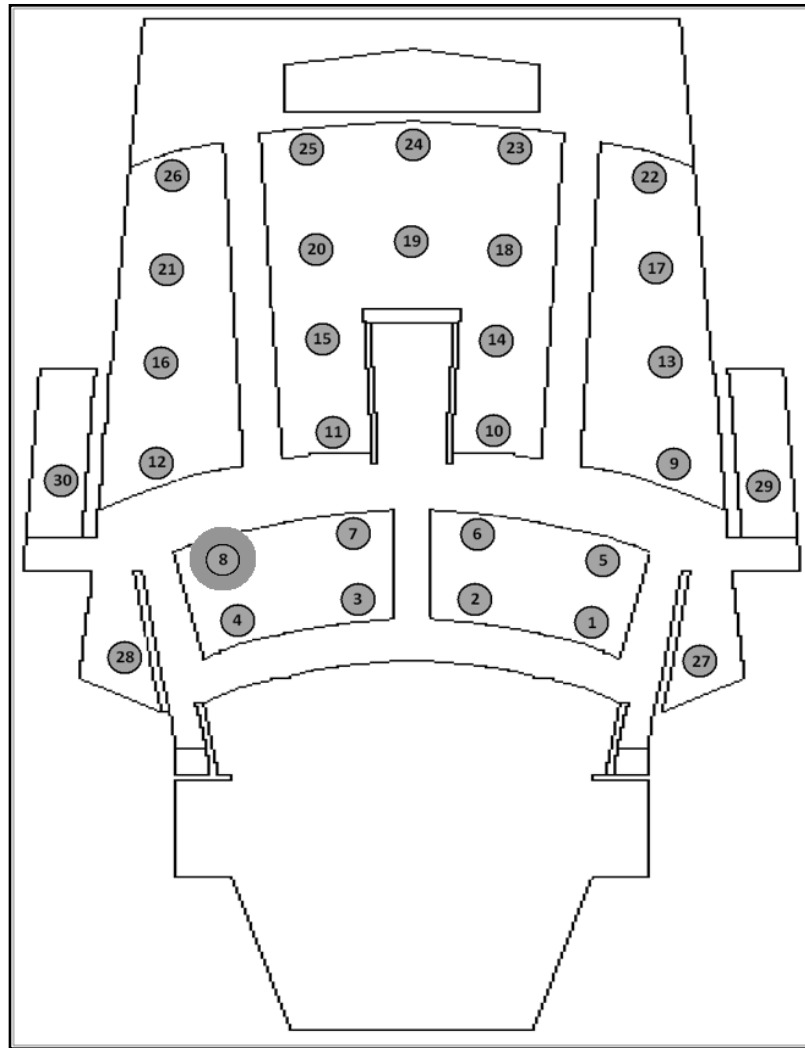
<b>Tipo de sala</b>	<b><math>RT_{mid}</math>, con sala ocupada (en s)</b>
Locutorio de radio	0,2 – 0,4
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0

**Tabla 3.2.**  $TR_{mid}$  recomendado en función del tipo de sala [13].

## 4.2. Comparativa de los 3 métodos de medida (Dirac)

A continuación se muestran los resultados de los parámetros acústicos del Auditorio analizados por Dirac correspondientes a los modos MLS Interno (**tabla 3.3**), MLS Externo (**tabla 3.4**) e Impulso Externo (**tabla 3.5**). Los datos expuestos pertenecen a la Posición 8 (**figura 3.1**).

Los resultados de la totalidad de las posiciones de medida para los tres modos de medida pueden consultarse en el **Anexo II.A**. Cabe resaltar que en el método MLS Interno no se dispone de datos referentes a las posiciones más alejadas del escenario debido a la corta longitud (20 m aproximadamente) del cable que conectaba el ordenador portátil (donde se ejecutaba el *software* Dirac) con la fuente sonora que excitaba la sala (altavoz B&K 4224). Las posiciones afectadas son: 17, 18, 19 y 20 (penúltima fila del anfiteatro), 21, 22, 23, 24 y 25 (última fila del anfiteatro) y 30 (palco lateral superior).



**Figura 3.1.** Posiciones de medida. Posición 8 señalada.

Empleando los valores correspondientes a la posición 8 reflejados en las tablas se realizará una comparación entre los tres métodos con el objetivo de averiguar cuál es el más idóneo, el que presenta mejores resultados. Los valores de los parámetros acústicos según el método elegido serán analizados con mayor profundidad en el **epígrafe 3.3**.

Esta comparativa se centra en los seis parámetros que se han considerado más relevantes:

- **INR** (*Impulse response to Noise Ratio*)
- **C<sub>80</sub>** (Claridad musical)
- **D<sub>50</sub>** (Definición)
- **SNR** (Relación señal-ruido)
- **STI** (*Speech Transmission Index*) y RASTI (RAPid STI)
- **% ALCons** (% *Articulation Loss of Consonants*).

<b>POSICIÓN 8</b>
<b>INTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,873	0,612	1,143	1,447	1,199	1,519	1,278	0,522
CC [-]:	-0,99	-0,958	-0,992	-0,997	-0,993	-0,997	-0,997	-0,916
T10 [s]:	0,95	1,128	0,998	1,225	1,086	1,421	1,243	0,946
CC [-]:	-0,93	-0,987	-0,994	-0,996	-0,999	-0,998	-1	-0,987
T20 [s]:	0,842	0,997	1,124	1,357	1,325	1,397	1,235	1,024
CC [-]:	-0,951	-0,995	-0,997	-0,998	-0,995	-1	-1	-0,998
T30 [s]:	0,84	0,842	1,131	1,351	1,376	1,497	1,264	1,065
CC [-]:	-0,949	-0,99	-0,999	-0,999	-0,998	-0,999	-1	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>13	31	39	48	50	46	44
G [dB]:	-163,4	-149,4	-137,7	-127,6	-123,2	-122,4	-127

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1885,5	238,4	77,3	67,4	47	77,6	67,1
C80 [dB]:	-2,49	4,43	4,72	3,61	5,38	2,64	3,82
D50 [-]:	0,24	0,18	0,59	0,62	0,72	0,56	0,62

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,34	6,78	-2,07	-2,25	-4,13	-1,59	-1,87
ST late [dB]:	2,5	0,5	-4,46	-2,58	-5,44	-1,71	-2,6
ST total [dB]:	4,33	7,71	-0,12	0,6	-1,73	1,36	0,78

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	20	31	32	29	26	25
EDT [s]:	0,61	1,14	1,45	1,2	1,52	1,28	0,52
D50:	0,18	0,59	0,62	0,72	0,56	0,62	0,9
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,64	(Good)
% ALC	5,4	
STI	0,64	(Good)
% ALC	5,3	
STIPA female	0,63	(Good)
% ALC	5,5	
RASTI	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STI male	0,64	(Good)
% ALC	5,5	

STIPA male	0,64	(Good)
% ALC	5,4	
STITEL	0,67	(Good)
% ALC	4,4	

**Tabla 3.3.** Parámetros acústicos obtenidos en la posición 8 con el método MLS Interno.

**POSICIÓN 8**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,713	0,589	1,102	1,226	1,386	1,365	1,271	1,126
cc [-]:	-0,993	-0,961	-0,993	-0,998	-0,994	-0,994	-0,998	-0,994
T10 [s]:	0,72	0,775	0,931	1,124	1,246	1,194	1,26	1,013
cc [-]:	-0,987	-0,984	-0,994	-0,996	-0,997	-0,999	-0,999	-0,999
T20 [s]:	0,576	0,899	0,884	1,023	1,05	1,216	1,324	0,93
cc [-]:	-0,912	-0,995	-0,996	-0,998	-0,997	-0,999	-0,998	-0,996
T30 [s]:	0,545	0,603	1,11	0,933	0,983	1,127	0,935	0,798
cc [-]:	-0,869	-0,968	-0,994	-0,992	-0,986	-0,994	-0,98	-0,971

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	13	25	25	25	24	24	24
G [dB]:	-169,4	-157,67	-146,83	-136,58	-133,74	-130,94	-136,38

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2456,9	652,6	643,6	589,7	547,3	584,9	601,7
C80 [dB]:	-9,34	2,16	0,64	0,91	2,03	0,58	0,83
D50 [-]:	0,17	0,19	0,41	0,42	0,57	0,49	0,49

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	2,55	9,18	-0,18	0,35	-3,56	-2,02	-0,74
ST late [dB]:	9,95	6,06	1,25	1,65	-0,95	1,34	1,31
ST total [dB]:	10,14	10,78	3,58	4,09	0,92	2,99	3,41

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	5	5	6	5	5	4
EDT [s]:	0,59	1,1	1,23	1,39	1,37	1,27	1,13
D50:	0,19	0,41	0,42	0,57	0,49	0,49	0,49
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,49	(Fair)
% ALC	11,7	
STI	0,5	(Fair)
% ALC	11,3	
STIPA female	0,51	(Fair)
% ALC	11	
RASTI	0,48	(Fair)
% ALC	12,3	

STI male	0,5	(Fair)
% ALC	11,3	

STIPA male	0,51	(Fair)
% ALC	10,9	
STITEL	0,51	(Fair)
% ALC	11	

**Tabla 3.4.** Parámetros acústicos obtenidos en la posición 8 con el método MLS Externo.

**POSICIÓN 8**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	82,899	1,195	1,063	1,203	1,226	1,224	0,851	0,843
cc [-]:	-0,625	-0,988	-0,987	-0,992	-0,996	-0,997	-0,96	-0,995
T10 [s]:	0,02	0,864	1,283	1,391	1,396	1,314	1,129	0,828
cc [-]:	-0,957	-0,993	-0,998	-0,994	-0,997	-0,997	-1	-0,999
T20 [s]:	0,015	0,849	1,157	1,266	1,416	1,629	1,238	0,928
cc [-]:	-0,903	-0,995	-0,996	-0,998	-0,999	-0,997	-0,998	-0,998
T30 [s]:	0,014	0,812	1,155	1,331	1,47	1,688	1,436	1,076
cc [-]:	-0,889	-0,992	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,997	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>24	>34	>44	>50	>49	>47	>57
G [dB]:	-30,97	-21,56	-4,71	3,36	4,23	2,69	6,36

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	705,8	140,1	94,6	105,1	82	79,8	35,9
C80 [dB]:	-0,72	0,45	2,81	-0,11	2,18	2,3	7,81
D50 [-]:	0,46	0,19	0,22	0,23	0,44	0,51	0,79

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,17	10,95	8,13	5,48	2,19	1,85	-3,9
ST late [dB]:	-0,78	10,38	5,29	5,52	0,77	1,21	-6,16
ST total [dB]:	-0,54	13,24	9,89	8,48	4,61	4,53	-1,87

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	21	32	39	38	37	45	46
EDT [s]:	1,2	1,06	1,2	1,23	1,22	0,85	0,84
D50:	0,19	0,22	0,23	0,44	0,51	0,79	0,58
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	7	
STIPA female	0,59	(Fair)
% ALC	7	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,5	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STIPA male	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STITEL	0,61	(Good)
% ALC	6,3	

**Tabla 3.5.** Parámetros acústicos obtenidos en la posición 8 con el método Impulso Externo.

### 4.2.1. Impulse response to Noise Ratio (INR)

Modo de medida	Parámetro	Frecuencia [Hz]						
		63	125	250	500	1 K	2 K	4 K
MLS INTERNO	INR [dB]	>13	31	39	48	50	46	44
MLS EXTERNO		13	25	25	25	24	24	24
IMPULSO EXTERNO		>24	>34	>44	>50	>49	>47	>57

Tabla 3.6. Comparación del parámetro INR.

Los datos del método MLS Externo son sensiblemente peores que los presentados por el MLS Interno e Impulso Externo. Considerando como aceptables los valores aportados por estos dos últimos, se percibe que el modo de medida Impulso Externo es el que posee la mejor relación respuesta impulsiva-ruido.

### 4.2.2. Claridad musical, C<sub>80</sub>

Modo de medida	Parámetro	Frecuencia [Hz]						
		63	125	250	500	1 K	2 K	4 K
MLS INTERNO	C <sub>80</sub> [dB]	-2,49	4,43	4,72	3,61	5,38	2,64	3,82
MLS EXTERNO		-9,34	2,16	0,64	0,91	2,03	0,58	0,83
IMPULSO EXTERNO		-0,72	0,45	2,81	-0,11	2,18	2,30	7,81

Tabla 3.7. Comparación del parámetro C<sub>80</sub>.

Los valores de claridad musical comprendidos entre 1 y 3 dB se consideran adecuados [13]. Además, cuanto más alto sea este resultado, mayor será la energía recibida durante los primeros 80 ms y, en consecuencia, existirá aún más inteligibilidad en relación a los sonidos que se produzcan en la sala. En base a lo anterior, el método que aporta unos mejores datos de C<sub>80</sub> es el MLS Interno.

### 4.2.3. Definición, D<sub>50</sub>

Modo de medida	Parámetro	Frecuencia [Hz]						
		63	125	250	500	1 K	2 K	4 K
MLS INTERNO	D <sub>50</sub>	0,24	0,18	0,59	0,62	0,72	0,56	0,62
MLS EXTERNO	[Intervalo de 0 a 1]	0,17	0,19	0,41	0,42	0,57	0,49	0,49
IMPULSO EXTERNO		0,46	0,19	0,22	0,23	0,44	0,51	0,79

Tabla 3.8. Comparación del parámetro D<sub>50</sub>.

Este parámetro debe ser mayor a 0,5 para considerarse apto [13]. Por lo tanto, el método que cumple esta condición en un mayor número de frecuencias es, con diferencia, el MLS Interno.

#### 4.2.4. Relación señal-ruido (SNR)

Modo de medida	Parámetro	Frecuencia [Hz]						
		63	125	250	500	1 K	2 K	4 K
MLS INTERNO	SNR [dB]	12	20	31	32	29	26	25
MLS EXTERNO		5	5	5	6	5	5	4
IMPULSO EXTERNO		21	32	39	38	37	45	46

Tabla 3.9. Comparación del parámetro SNR.

Los datos del método MLS Externo son mucho peores que los presentados por el MLS Interno e Impulso Externo ya que la relación señal-ruido es mejor cuanto mayor sea su valor. Así, se consideran aceptables los resultados obtenidos por estos dos últimos, ya que cumplen una relación SNR mayor a 25 dB [13] en la mayoría de las bandas frecuenciales, percibiéndose que el modo de medida Impulso Externo es el que posee la mejor relación señal a ruido.

#### 4.2.5. STI, RASTI y % ALCons

Modo de medida	Parámetro		Parámetro	
MLS INTERNO	STI	0,64 (Bueno)	RASTI	0,58 (Regular)
	% ALCons	5,3	% ALCons	7,4
MLS EXTERNO	STI	0,64 (Bueno)	RASTI	0,58 (Regular)
	% ALCons	11,3	% ALCons	12,3
IMPULSO EXTERNO	STI	0,59 (Regular)	RASTI	0,51 (Regular)
	% ALCons	7	% ALCons	10,5

Tabla 3.10. Comparación de los parámetros STI, RASTI y % ALCons.

En cuanto a los valores de STI y RASTI, los presentados en los métodos MLS Interno y MLS Externo son igual de óptimos. En cambio el valor de %ALCons es considerablemente mejor en el MLS Interno ya que muestra unas pérdidas de inteligibilidad del 5,3% frente al 11,3% en el caso del STI, y del 7,4% frente al 12,3% en el RASTI. Por lo tanto, el método MLS Interno es el que aporta unos mejores resultados en los parámetros de inteligibilidad.

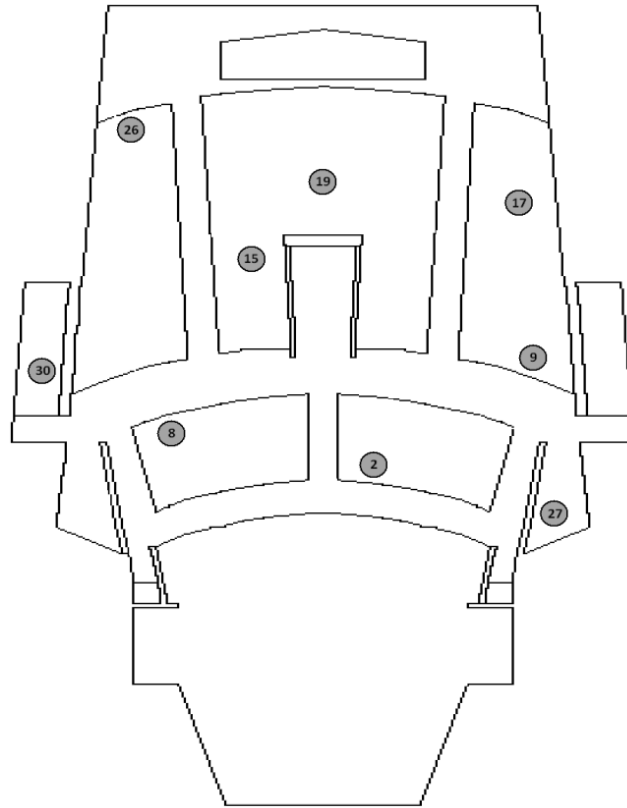
#### 4.2.6. Método escogido

Atendiendo al análisis previo realizado se tomará como método de referencia para el posterior estudio detallado de las condiciones acústicas del recinto el **Impulso Externo**. El modo MLS Interno también ofrece unos valores adecuados para los distintos parámetros acústicos, sin embargo, en este método no se dispone de resultados en todas las posiciones de medida de la sala. Por esta razón, se descartó este modo y se eligió el Impulso Externo.



### 4.3. Parámetros acústicos (Dirac y EASE)

Se han escogido nueve posiciones representativas, repartidas por todo el Auditorio, para mostrar las condiciones acústicas de la sala en distintas zonas de las áreas de audiencia. Las posiciones elegidas fueron la 2, 8, 9, 15, 17, 19, 26, 27 y 30.



**Figura 3.2.** Situación de las nueve posiciones de medida seleccionadas.

La relación de los parámetros que se han considerado de especial relevancia a la hora de determinar la calidad de las condiciones acústicas del recinto es la expuesta en la **tabla 3.11**.

Dirac	EASE
	Tiempo de reverberación ( $TR_{30}$ )
	Claridad musical ( $C_{80}$ )
	RASTI
	Inteligibilidad (% ALCons)
Definición ( $D_{50}$ )	Claridad de la voz ( $C_{50}$ )
<i>Early Decay Time</i> (EDT)	Nivel directo ( $SPL_D$ )
	Nivel total ( $SPL_T$ )
	D/R Ratio
	Distancia crítica ( $D_C$ )
	First Arrival

**Tabla 3.11.** Relación de parámetros a estudiar proporcionados por Dirac y EASE.

Los primeros cuatro parámetros acústicos los proporcionan ambos *softwares*, hecho que servirá para contrastar la realidad acústica del Auditorio vacío medida en Dirac con la simulación realizada en EASE en condiciones de sala ocupada.

Los datos correspondientes a la frecuencia de 63 Hz que se presenten en los próximos apartados no son plenamente fiables ya que la fuente sonora utilizada para excitar la sala carece de una adecuada respuesta a muy baja frecuencia.

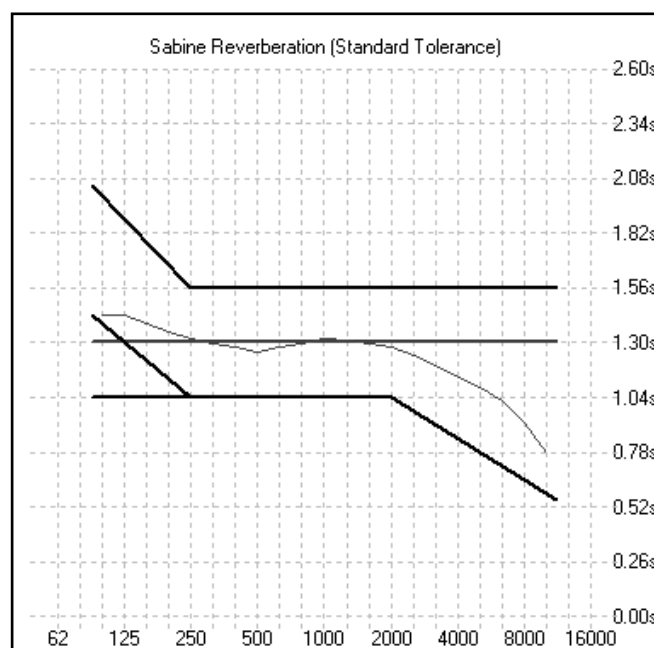
### 4.3.1. Tiempo de reverberación, $TR_{30}$

#### b) Simulación acústica (EASE)

En la simulación acústica de la sala se intenta lograr que el tiempo de reverberación proporcionado por EASE sea muy similar al calculado a partir de las medidas realizadas *in situ* (1,3 segundos). Mediante el ajuste de los materiales acústicos empleados como revestimiento en las superficies del recinto, se logró en la simulación un comportamiento acústico prácticamente análogo al real en términos de su tiempo de reverberación, alcanzándose los valores mostrados en la **tabla 4.12**.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz	$TR_{mid}$
$TR_{30}$ [s]	1,43	1,32	1,26	1,32	1,28	1,13	0,92	<b>1,29</b>

**Tabla 3.12.** Valores del tiempo de reverberación en EASE.



**Figura 3.3.** Representación del tiempo de reverberación de la simulación acústica del Auditorio en EASE. Trazo azul: valor del TR en función de la frecuencia. Trazo rojo: valor del TR deseado. Trazo negro: márgenes de tolerancia.

Los valores obtenidos son adecuados ya que en las frecuencias de 500 Hz y 1 KHz se mantiene un valor aproximado de 1,3 segundos tal y como se pretendía. Además, teniendo en cuenta los márgenes de tolerancia para este parámetro (**figura 3.3**), se demuestra que el tiempo de reverberación en el resto de frecuencias se encuentra dentro del rango óptimo.

### 4.3.2. Claridad musical, $C_{80}$

T. Hidaka propone que la claridad musical en los teatros debe oscilar entre 1 y 3 dB [13]. Cuanto más elevado sea su valor, más óptima será la claridad musical del recinto.

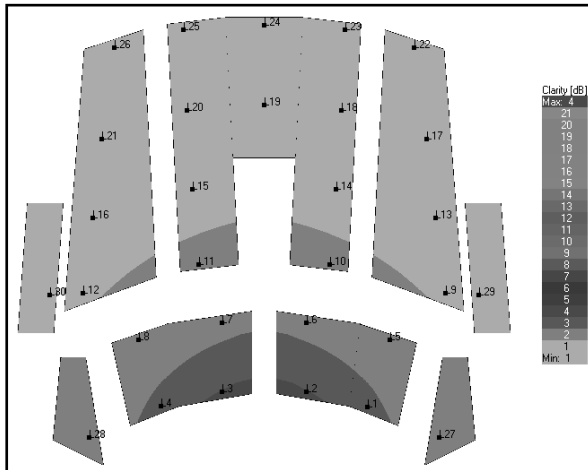
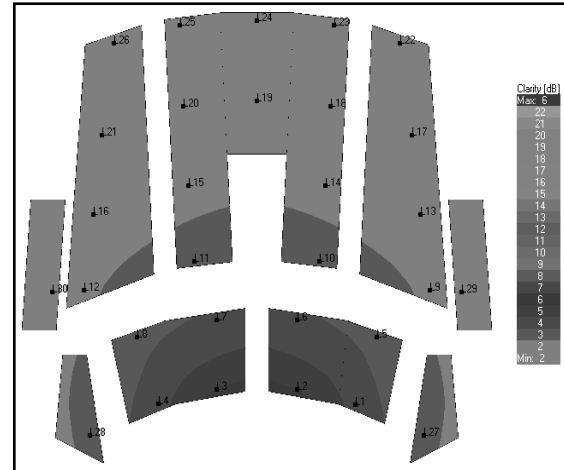
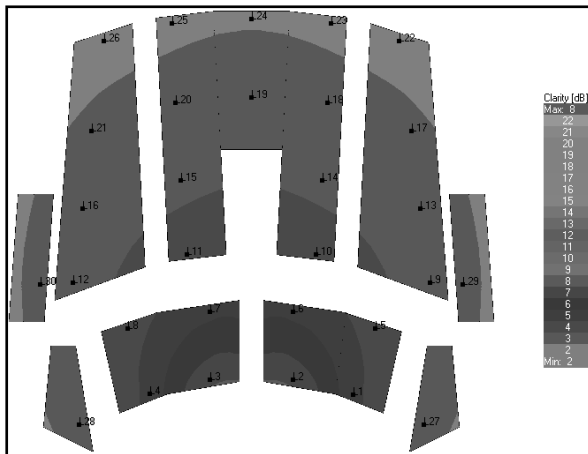
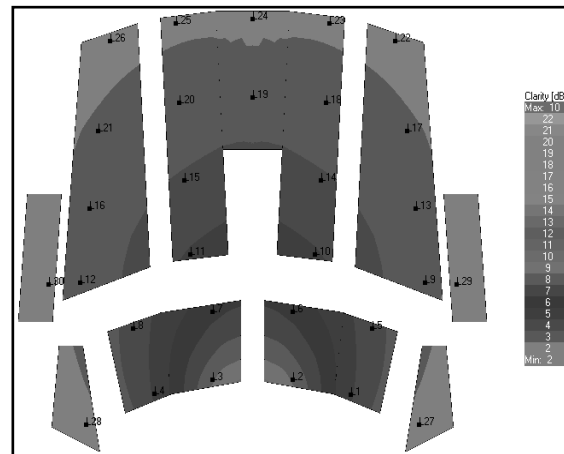
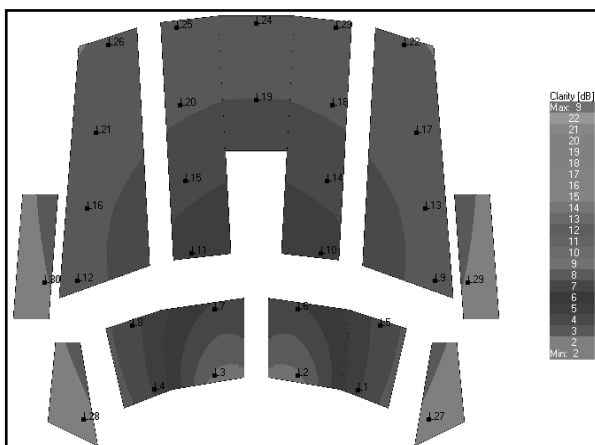
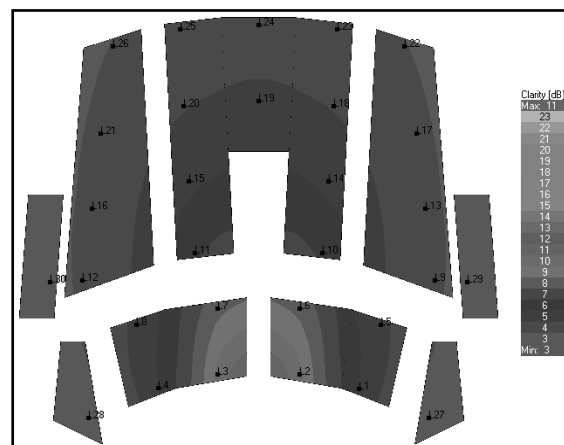
#### a) Medición en la sala (Dirac)

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1 K	2 K	4 K
2	$C_{80}$ [dB]	11,09	-0,59	-3,45	-0,29	1,22	2,72
8		0,45	2,81	-0,11	2,18	2,30	7,81
9		-1,87	-1,47	0,22	1,73	0,44	2,65
15		0,82	-0,37	-0,20	0,23	0,29	1,98
17		1,30	1,51	0,66	0,12	-0,19	-0,59
19		0,87	-0,64	-1,00	0,98	-1,87	-1,01
26		-0,08	-2,39	-1,44	0,58	-1,53	0,38
27		13,5	1,58	1,09	2,96	3,56	4,33
30		0,88	-0,98	-1,78	1,76	-0,84	0,19

**Tabla 3.13.** Resultados del parámetro  $C_{80}$  en Dirac.  
Sombreado amarillo: valores entre 1 y 3 dB. Sombreado verde: valores superiores a 3 dB.

Los datos válidos se concentran en las posiciones 2, 8, 9, 17 y 27 que son las que se encuentran más próximas del escenario. Esta cercanía a la fuente sonora implica que la cantidad de energía de sonido directo que se percibe en estas sea mayor respecto a la que llega a las posiciones más alejadas. Así, en puntos cercanos al escenario, la relación (cociente) entre el nivel de las primeras reflexiones hasta los 80 ms frente al de las reflexiones que llegan a estos puntos cercanos a partir de los 80 ms resulta un valor más elevado, llegando incluso a sobrepasarse los márgenes establecidos, concretamente en las posiciones 2, 8 y 27.

## b) Simulación acústica (EASE)

Figura 3.5. Gráfica del  $C_{80}$  a 125 Hz en EASE.Figura 3.6. Gráfica del  $C_{80}$  a 250 Hz en EASE.Figura 3.7. Gráfica del  $C_{80}$  a 500 Hz en EASE.Figura 3.8. Gráfica del  $C_{80}$  a 1 KHz en EASE.Figura 3.9. Gráfica del  $C_{80}$  a 2 KHz en EASE.Figura 3.10. Gráfica del  $C_{80}$  a 4 KHz en EASE.

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1 K	2 K	4 K
2	C <sub>80</sub> [dB]	4	5	7	8	9	10
8		2	3	4	4	4	5
9		1	2	3	3	3	4
15		1	2	3	4	4	5
17		1	2	3	3	3	4
19		1	2	3	3	4	5
26		1	2	2	2	3	4
27		2	3	3	2	2	3
30		1	2	3	2	2	2

**Tabla 3.14.** Resultados del C<sub>80</sub> en EASE.

Sombreado amarillo: valores entre 1 y 3 dB. Sombreado verde: valores superiores a 3 dB.

Se observa que la claridad musical mejora ligeramente conforme aumenta la frecuencia. Esto es visible, sobre todo, en las zonas más próximas al centro del escenario, donde llegan a alcanzarse valores de 10 dB a 4 KHz frente a los 4 dB que se obtienen a 125 Hz.

Al igual que sucedía en los resultados brindados por Dirac en la medida de la respuesta impulsiva, conforme aumenta la distancia respecto al escenario empeoran sensiblemente los índices de claridad musical.

Cabe resaltar los resultados en EASE correspondientes a los palcos del recinto (posiciones 27 y 30). Siguiendo lo establecido anteriormente, en estos puntos que están relativamente cerca del escenario, aunque escorados, debería mostrarse una mejor claridad musical respecto a la existente en lugares más alejados (por ejemplo en la posición 19). Sin embargo, hay que tomar en consideración la influencia que ejerce la directividad de la radiación de la fuente sonora, provocando que a medida que nos alejemos del eje de máxima radiación de esta (0°) se irá progresivamente igualando la cantidad de energía del sonido directo a la del reverberante, empeorando así la claridad musical en estos puntos.

**c) Comparación entre los resultados de Dirac y EASE**

Contrastando los resultados con el recinto ocupado (EASE) con los obtenidos en condiciones de sala vacía (Dirac) se percibe, en general, un aumento en los valores y, por tanto, de la claridad musical con la presencia de público en el espacio.

### 4.3.3. Articulation Loss of Consonants, % ALCons

#### a) Medición en la sala (Dirac)

En la **tabla 3.15** se presentan los datos obtenidos en Dirac para este parámetro de inteligibilidad. Este *software* no tiene en cuenta la variación de frecuencias calculando un solo valor por posición de medida. A continuación, se analizan dichos resultados considerando la valoración establecida teóricamente [24] (**tabla 3.16**).

Posición	Parámetro	
2	ALCons [%]	10,9
8		10,5
9		11,7
15		10,6
17		10,8
19		14,6
26		13,7
27		8,7
30		13,2

**Tabla 3.15.** Resultados del %ALCons en Dirac.

En general todos los valores son tolerables ya que ninguno excede el 15% (pérdida máxima aceptable), aunque todos se encuentran dentro del intervalo considerado como "Pobre".

#### b) Simulación acústica (EASE)

Al contrario que en anterior caso, la simulación en EASE sí tiene en cuenta las distintas bandas de frecuencia, en concreto las de 500 Hz, 1 KHz y 2 KHz. Se prestará especial atención a la banda espectral de 2 KHz por ser la de máxima contribución a la inteligibilidad en cuanto a la presencia de consonantes [13].

% ALCons	Valoración
0% - 3%	Excelente
3% - 7%	Buena
7% - 15%	Regular
15% - 33%	Pobre
> 33%	Mala (Incomprensible)

**Tabla 3.16.** Valoración teórica del %ALCons.

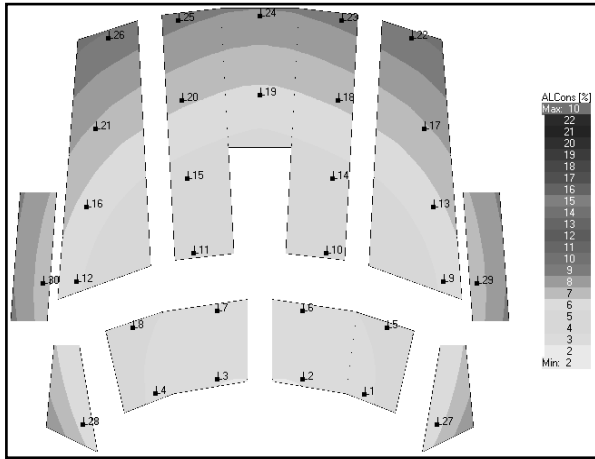


Figura 3.11. Gráfica del %ALCons a 500 Hz en EASE.

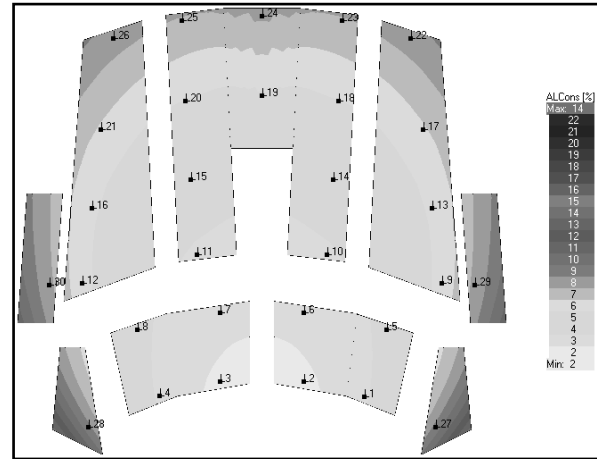


Figura 3.12. Gráfica del %ALCons a 1KHz en EASE.

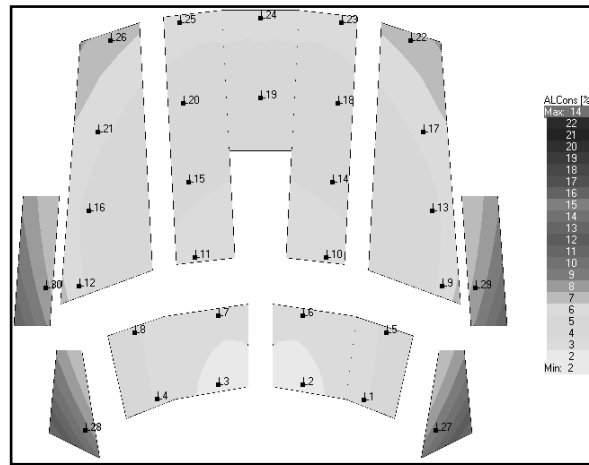


Figura 3.13. Gráfica del %ALCons a 2KHz en EASE.

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]		
		500	1 K	2 K
2	ALCons [%]	3	2	2
8		4	4	4
9		6	6	6
15		5	4	4
17		7	7	6
19		6	6	4
26		9	9	7
27		6	9	9
30		7	8	8

Tabla 3.17. Resultados del % ALCons en EASE.

Los valores de % ALCons recogidos en la **tabla 3.17** se localizan en el intervalo 2% - 9%, teniendo por lo general las posiciones un mejor %ALCons conforme estén más cerca del escenario. Mención aparte reciben los palcos, los cuales tienen peores índices respecto a otros

puntos situados aproximadamente a la misma distancia de la fuente sonora. Los palcos ocupan las posiciones más alejadas del eje de máxima radiación de la fuente sonora y por lo tanto, a ellos llega en menor cantidad la energía procedente de las primeras reflexiones que son las más importantes para la buena inteligibilidad de la palabra.

No se observan grandes diferencias entre los valores correspondientes a cada una de las tres bandas espectrales estudiadas, aunque se percibe una ligera mejoría de éstos según aumenta la frecuencia, sobre todo en las posiciones más alejadas al escenario (15, 17, 19 y 26).

Atendiendo a la valoración teórica del %AlCons, se concluye que para todas las posiciones en estudio se puede calificar este parámetro como satisfactorio, llegando a ser en algunos casos excelente.

### c) Comparación entre los resultados de Dirac y EASE

Los resultados pertenecientes a la simulación, realizada con el recinto ocupado, denotan unos valores más aceptables en comparación a los obtenidos para la sala vacía en Dirac, La posición 27 constituye la excepción, siendo la inteligibilidad más satisfactoria según los datos recogidos en la medida *in situ*.

## 4.3.4. Rapid Speech Transmission Index, RASTI

### a) Medición en la sala (Dirac)

En la **tabla 3.18** se presentan los datos obtenidos en Dirac para este parámetro acústico. No tiene en cuenta la variación de frecuencias calculando un solo valor por posición. Los resultados se analizan considerando la valoración establecida en la **tabla 3.19**.

Posición	Parámetro	
2	RASTI [Intervalo de 0 a 1]	0,51 (Regular)
8		0,51 (Regular)
9		0,50 (Regular)
15		0,51 (Regular)
17		0,51 (Regular)
19		0,45 (Regular)
26		0,47 (Regular)
27		0,55 (Regular)
30		0,47 (Regular)

**Tabla 3.18.** Resultados del RASTI en Dirac.

RASTI	Valoración
0,75 - 1	Excelente
0,6 - 0,75	Buena
0,45 - 0,6	Regular
0,3 - 0,45	Pobre
0 - 0,3	Mala

**Tabla 3.19.** Valoración teórica del RASTI [24].



**b) Simulación acústica (EASE)**

A continuación se muestran los resultados presentados por EASE para las tres frecuencias de mayor interés (500 Hz, 1KHz y 2 KHz).

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]		
		500	1 K	2 K
2	RASTI [Intervalo de 0 a 1]	0,82	0,84	0,84
8		0,73	0,74	0,74
9		0,64	0,64	0,65
15		0,66	0,71	0,75
17		0,60	0,63	0,64
19		0,63	0,66	0,70
26		0,55	0,58	0,61
27		0,62	0,56	0,55
30		0,60	0,58	0,58

Tabla 3.20. Resultados del RASTI en EASE.

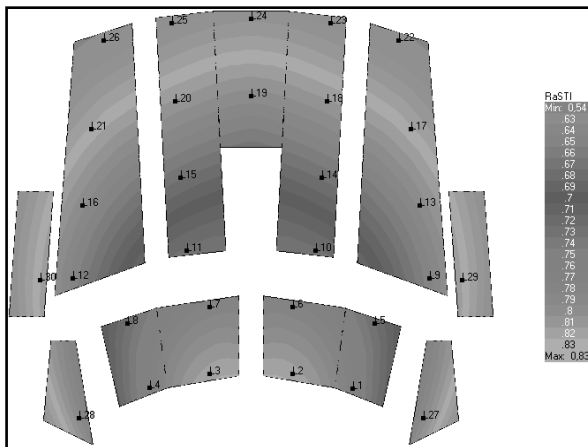


Figura 3.14. Gráfica del RASTI a 500 Hz en EASE.

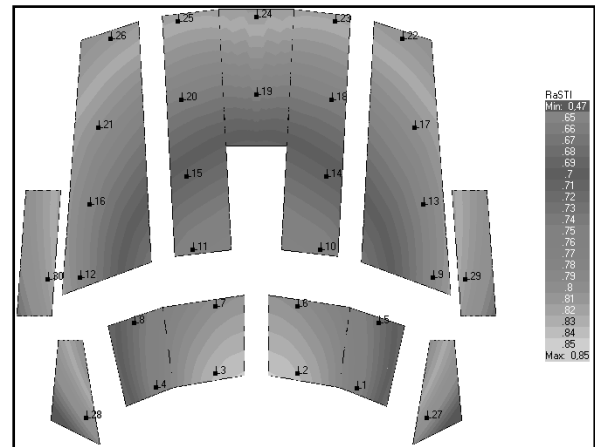


Figura 3.15. Gráfica del RASTI a 1 KHz en EASE.

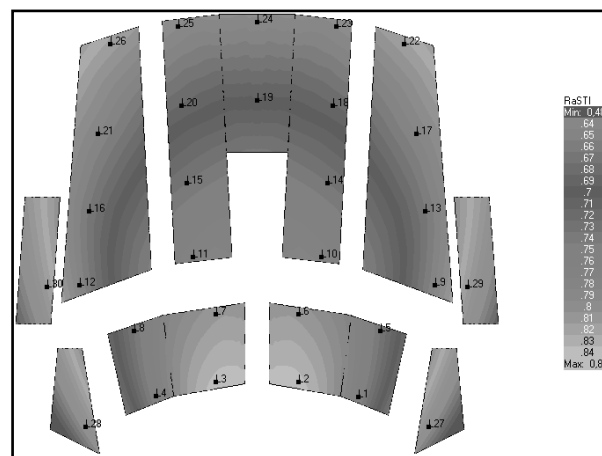


Figura 3.16. Gráfica del RASTI a 2 KHz en EASE.

En el cómputo global, los valores de este parámetro van desde 0,56 hasta 0,84 obteniéndose valoraciones “regulares” (posiciones 26, 27 y 30), “buenas” (posiciones 8, 9, 15, 17 y 19) y “excelentes” (posición 2), habiendo generalmente un mejor índice RASTI en las posiciones más cercanas y centradas respecto al escenario. Sin embargo, los palcos tienen un RASTI más deficiente respecto a otros puntos situados aproximadamente a la misma distancia de la fuente sonora. Esto es debido a que los palcos se encuentran ubicados en posiciones más alejadas del eje de máxima radiación de la fuente sonora y, por lo tanto, a ellos llega en menor cantidad la energía procedente del sonido directo, que es la más importante para la buena inteligibilidad de la palabra.

En la mayoría de las posiciones se observa un ligero aumento de la inteligibilidad conforme aumenta la frecuencia, alcanzando los máximos en la banda de 2 KHz donde se localiza la mayor contribución de consonantes. Esta mejora es más evidente en las posiciones centradas y alejadas al escenario.

### c) Comparación entre los resultados de Dirac y EASE

Contrastando estos valores ofrecidos por EASE con los obtenidos para la sala vacía, se demuestra que la sala ocupada ofrece mejores índices de RASTI, ya que se alcanzan calificaciones de inteligibilidad “buenas” y “excelentes”, mientras que en la sala vacía los índices del parámetro RASTI se consideran “regulares”.

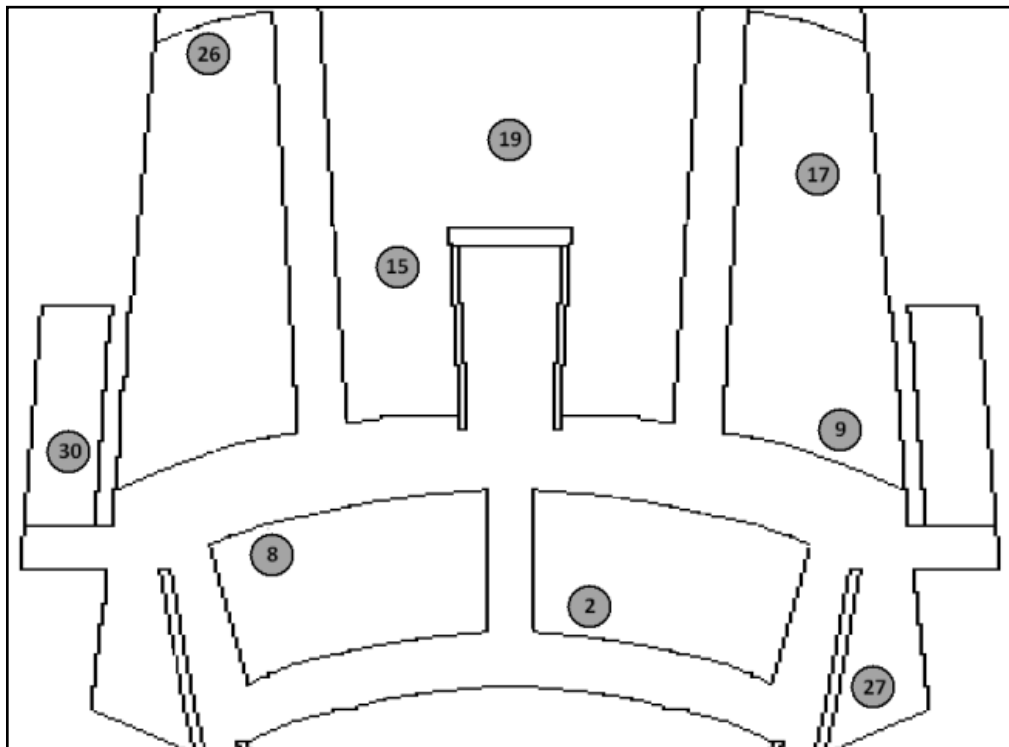


Figura 3.17. Detalle de las posiciones de medida en el Auditorio.

### 4.3.5. Definición, D<sub>50</sub>

Recordando la expresión teórica, este parámetro relaciona la energía en los primeros 50 ms con la energía total, debiendo cumplir con un valor mínimo de 0,5 [13]. Cuanto mayor sea este número mejor serán la inteligibilidad y la sonoridad en el punto de estudio, siendo mejor para las posiciones próximas al eje de máxima radiación de la fuente y empeorando según nos alejamos de la misma o nos desplazamos respecto a este ángulo central.

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1 K	2 K	4 K
2	D <sub>50</sub> [Intervalo de 0 a 1]	0,89	0,21	0,20	0,38	0,41	0,45
8		0,19	0,22	0,23	0,44	0,51	0,79
9		0,20	0,32	0,47	0,35	0,43	0,50
15		0,39	0,23	0,26	0,38	0,43	0,49
17		0,38	0,24	0,41	0,40	0,33	0,32
19		0,36	0,29	0,26	0,45	0,26	0,28
26		0,38	0,21	0,30	0,41	0,34	0,44
27		0,90	0,34	0,43	0,49	0,55	0,55
30		0,35	0,17	0,20	0,38	0,32	0,31

Tabla 3.21. Resultados del D<sub>50</sub> en Dirac. Sombreado verde: valores aptos.

En base a lo anterior, se han señalado en la **tabla 3.21** los valores aptos, observándose que únicamente se dan buenas condiciones de definición en las posiciones más cercanas a la fuente y a determinadas frecuencias. Por otra parte, no se evidencia un empeoramiento significativo de los índices de este parámetro conforme las posiciones se alejan del eje de máxima radiación.

### 4.3.6. Early Decay Time, EDT

El EDT se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB [13]. Al igual que en el caso del tiempo de reverberación, el EDT varía en función de la frecuencia.

Si existiese una perfecta difusión del sonido en el recinto, producida por una geometría regular del mismo y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos, el valor de EDT coincidiría con el del tiempo de reverberación. Sin embargo, en la práctica no suele existir una difusión perfecta, pudiendo ser el valor de EDT significativamente diferente al del TR.

En la siguiente **tabla 3.22** se revelan los valores de EDT correspondientes a cada una de las nueve posiciones en estudio. Se ha calculado la media de ellos en cada una de las frecuencias con el fin de comparar estos resultados con los del tiempo de reverberación que habían sido obtenidos en la simulación y, de esta manera, verificar el grado de similitud entre ambos.

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]						
		125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K
2	EDT [s]	1,03	0,92	1,26	1,43	1,17	0,99	0,80
8		1,20	1,06	1,20	1,23	1,22	0,85	0,84
9		1,09	0,80	1,46	1,24	1,32	1,10	0,83
15		1,28	1,11	1,24	1,26	1,34	1,19	0,93
17		0,87	0,98	1,35	1,44	1,24	1,14	0,96
19		1,02	1,14	1,35	1,47	1,62	1,44	1,18
26		1,03	1,24	1,41	1,48	1,48	1,40	1,12
27		1,70	1,25	1,41	1,17	1,09	0,93	0,70
30		0,94	1,13	1,27	1,28	1,44	1,18	1,00
<b>Media EDT</b>		<b>1,01</b>	<b>1,07</b>	<b>1,32</b>	<b>1,33</b>	<b>1,32</b>	<b>1,13</b>	<b>0,92</b>
<b>TR [s]</b>		<b>1,43</b>	<b>1,32</b>	<b>1,26</b>	<b>1,32</b>	<b>1,28</b>	<b>1,13</b>	<b>0,92</b>

**Tabla 3.22.** Relación entre el Tiempo de reverberación y el EDT.  
Sombreado amarillo: valores muy cercanos entre sí. Sombreado verde: valores idénticos.

Como se observa en la anterior tabla existe gran semejanza entre los valores de EDT y TR, llegando a ser idénticos en altas frecuencias. Estos difieren de manera considerable en las frecuencias graves posiblemente debido a la pobre respuesta a muy bajas frecuencias de la que disponía la fuente sonora con la que se realizaron las medidas *in situ*. Sin embargo, en la simulación estas condiciones sí fueron las adecuadas y, por eso, se obtiene un valor de tiempo de reverberación que se encuentra dentro de los valores de tolerancia, es decir, cercano a 1,3 s.

#### 4.3.7. Claridad de la voz, $C_{50}$

El valor representativo del  $C_{50}$  se calcula como la media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz y 4 KHz, y recibe el nombre de "*speech average*". Los factores de ponderación son 15%, 25%, 35% y 25% respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra [13]:

$$C_{50} = 0,15 \cdot C_{50} (500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50} (1 \text{ KHz}) + 0,35 \cdot C_{50} (2 \text{ KHz}) + 0,25 \cdot C_{50} (4 \text{ KHz})$$

Según L. G. Marshall, el valor recomendado correspondiente a cada punto de una sala ocupada debe verificar:

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

Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado.

Seguidamente se muestran las gráficas obtenidas en EASE para este parámetro en función de la frecuencia:

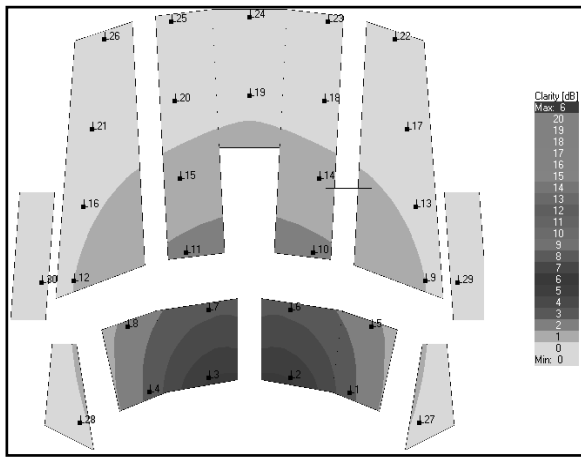


Figura 3.18. Gráfica del C<sub>50</sub> a 500 Hz en EASE.

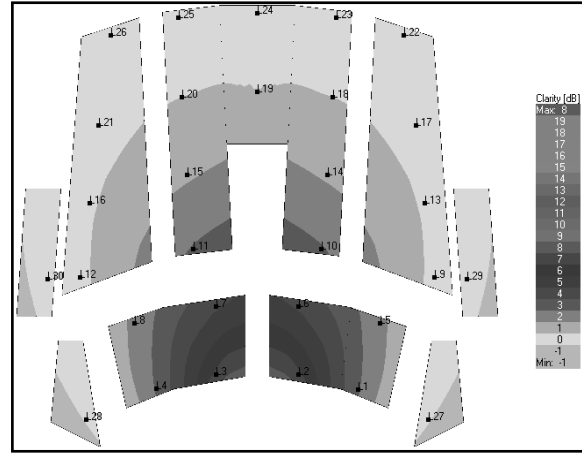


Figura 3.19. Gráfica del C<sub>50</sub> a 1 KHz en EASE.

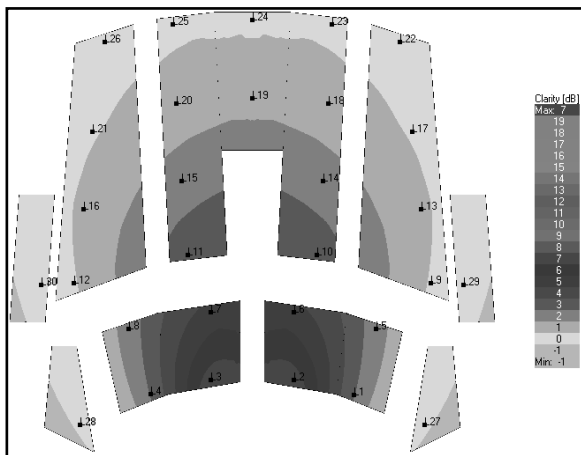


Figura 3.20. Gráfica del C<sub>50</sub> a 2 KHz en EASE.

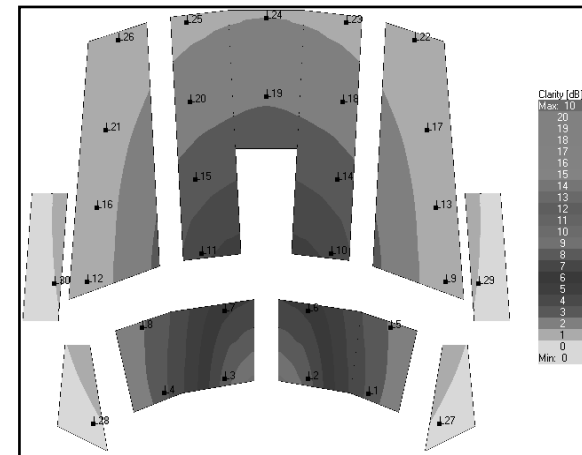


Figura 3.21. Gráfica del C<sub>50</sub> a 4 KHz en EASE.

En la **tabla 3.23** se exponen los cálculos realizados para obtener un único valor de C<sub>50</sub> ponderado en cada posición de estudio.

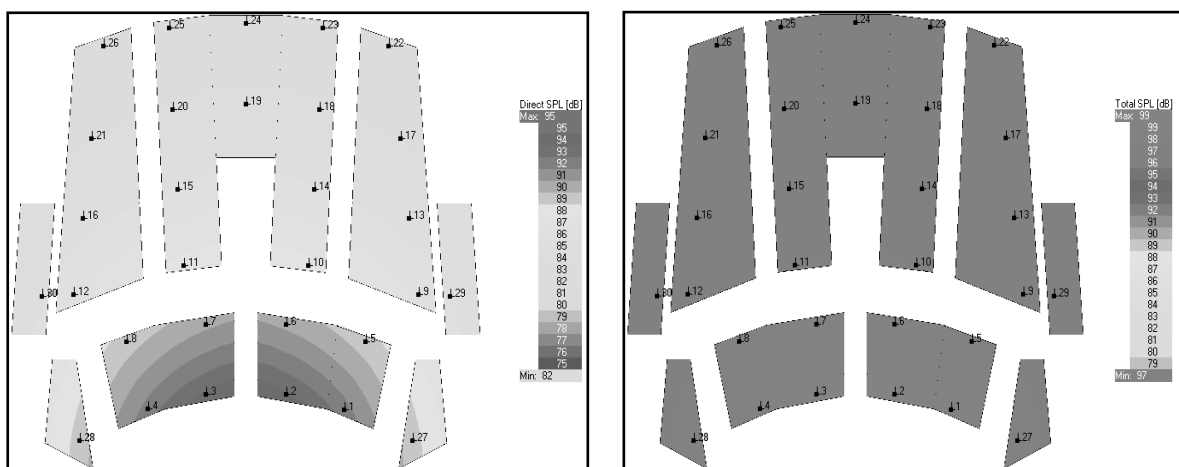
Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]				C <sub>50</sub> ponderado
		500	1 K	2 K	4 K	
2	C <sub>50</sub> [dB]	5	7	7	8	6,95
8		2	2	2	2	2
9		1	0	0	1	0,4
15		1	1	2	3	1,85
17		0	0	0	1	0,25
19		0	1	1	2	1,05
26		0	0	0	1	0,25
27		0	0	0	0	0
30		0	0	0	0	0

**Tabla 3.23.** Resultados del C<sub>50</sub> en EASE y cálculo de su ponderación.  
Sombreado verde: valores adecuados. Sombreado naranja: valores cercanos a los aptos.

El criterio expuesto por Marshall solo se cumple para la posición 2. Este valor es bastante elevado lo cual implica una buena inteligibilidad y sonoridad en dicho punto de la sala. A pesar de que el resto de posiciones no cumplen este criterio, las más cercanas al escenario o, en su defecto, las más centradas respecto al eje de máxima radiación son las más favorecidas en cuanto a la inteligibilidad.

#### 4.3.8. Nivel directo (SPL<sub>D</sub>) y Nivel total (SPL<sub>T</sub>)

En este apartado se contrastan los niveles de presión sonora que se obtienen a distintas frecuencias a lo largo de toda la superficie del recinto. Se recuerda que: el nivel total (SPL<sub>T</sub>) en un punto de la sala es la suma del nivel directo (SPL<sub>D</sub>) y del nivel reverberante (SPL<sub>R</sub>) que llegan a esa posición. En las parejas de gráficas mostradas a continuación, el nivel directo se representa en la gráfica de la izquierda y el nivel total en la de la derecha.



**Figura 3.22.** Gráficas del Nivel Directo y Nivel Total a 125 Hz en EASE.

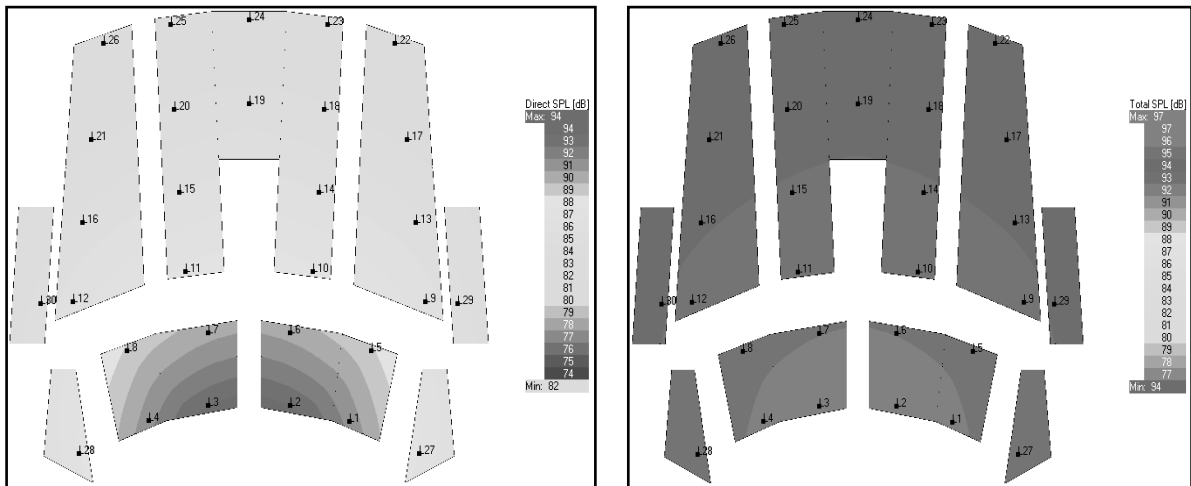


Figura 3.23. Gráficas del Nivel Directo y Nivel Total a 250 Hz en EASE.

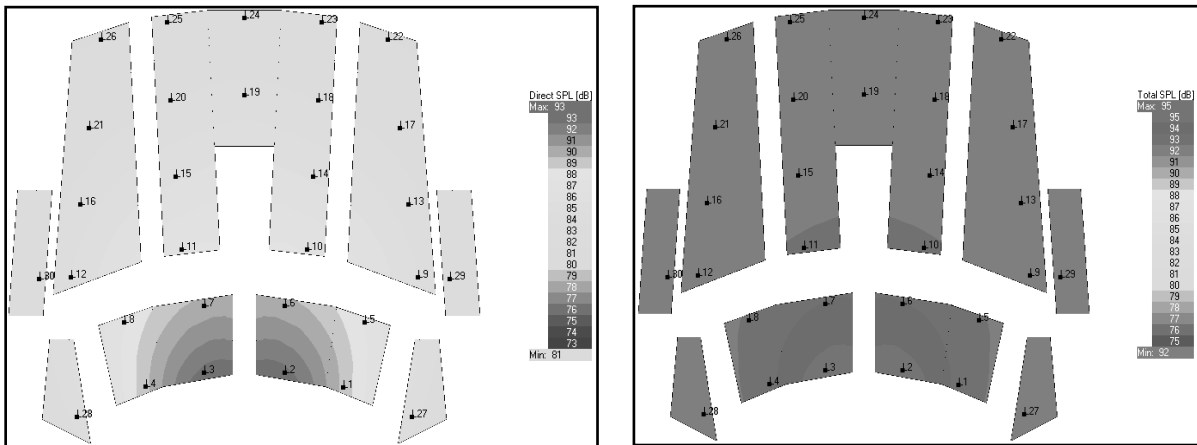


Figura 3.24. Gráficas del Nivel Directo y Nivel Total a 500 Hz en EASE.

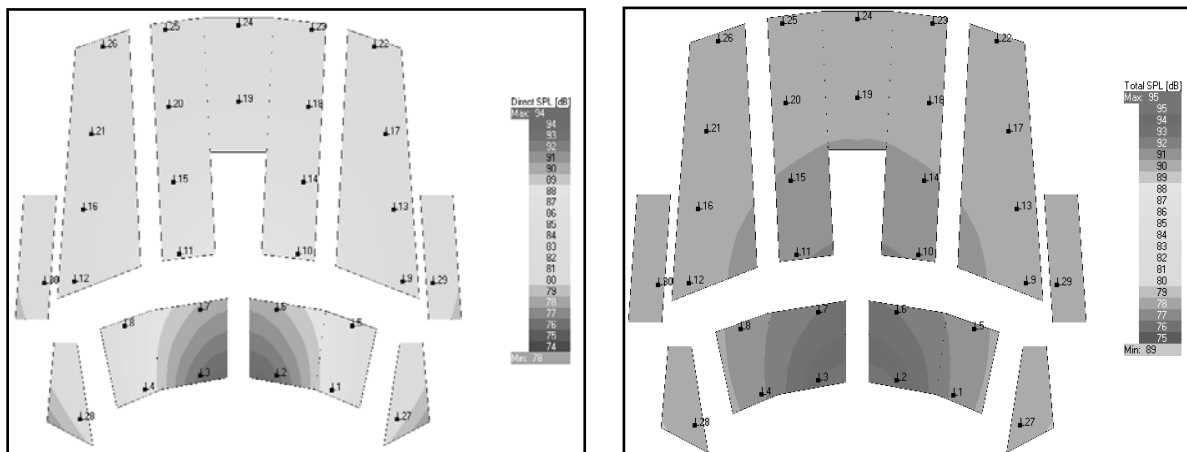


Figura 3.25. Gráficas del Nivel Directo y Nivel Total a 1KHz en EASE.

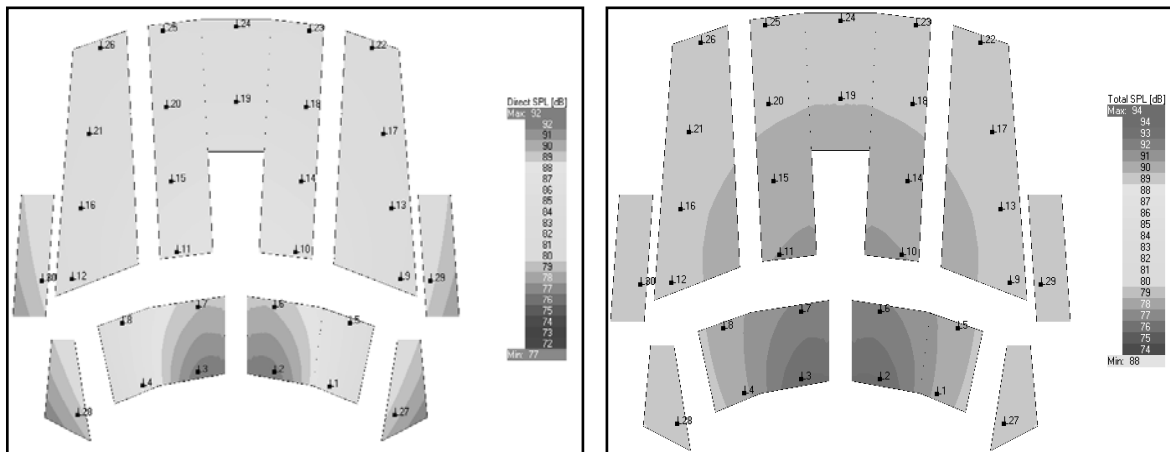


Figura 3.26. Gráficas del Nivel Directo y Nivel Total a 2 KHz en EASE.

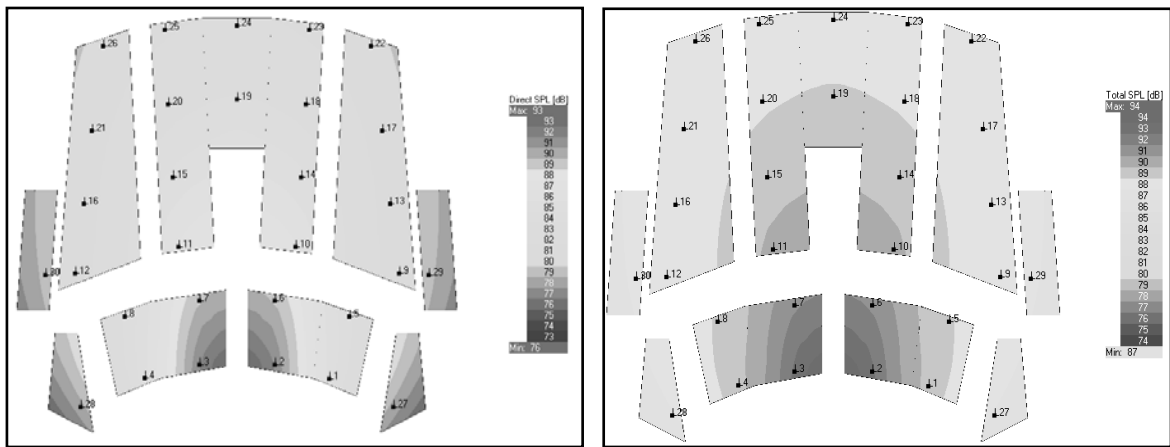


Figura 3.27. Gráficas de Nivel Directo y Nivel Total a 4 KHz en EASE.

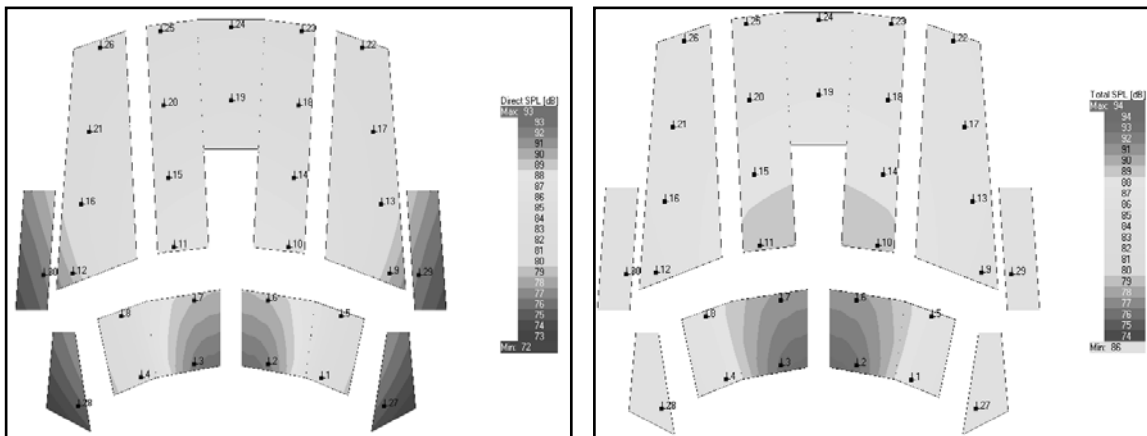


Figura 3.28. Gráficas de Nivel Directo y Nivel Total 8 KHz en EASE.



Seguidamente, en la **tabla 3.24** se exponen los datos que han sido extrapolados de las gráficas anteriores según la leyenda de colores que proporciona el EASE para cada una de ellas. Se han resaltado en color lila las posiciones con el nivel más alto alcanzado tanto en el nivel directo ( $SPL_D$ ) como en el nivel total ( $SPL_T$ ). Asimismo, se han marcado en celeste las posiciones que presentan los valores mínimos para ambos niveles.

Posición	Frecuencia [Hz]													
	125		250		500		1 K		2 K		4 K		8 K	
	Niveles [dB]													
	$SPL_D$	$SPL_T$	$SPL_D$	$SPL_T$	$SPL_D$	$SPL_T$	$SPL_D$	$SPL_T$	$SPL_D$	$SPL_T$	$SPL_D$	$SPL_T$	$SPL_D$	$SPL_T$
<b>2</b>	<b>94</b>	<b>99</b>	<b>93</b>	<b>97</b>	<b>93</b>	<b>95</b>	<b>93</b>	<b>94</b>	<b>92</b>	<b>93</b>	<b>91</b>	<b>93</b>	<b>92</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	89	98	89	95	85	93	86	91	85	90	84	89	83	88
<b>9</b>	86	<b>97</b>	87	95	84	<b>92</b>	84	<b>90</b>	82	<b>89</b>	81	88	79	<b>86</b>
<b>15</b>	86	<b>97</b>	87	95	85	<b>92</b>	83	91	85	90	85	89	85	88
<b>17</b>	83	<b>97</b>	84	<b>94</b>	83	<b>92</b>	82	<b>90</b>	82	<b>89</b>	81	88	81	87
<b>19</b>	84	<b>97</b>	85	<b>94</b>	84	<b>92</b>	83	<b>90</b>	83	<b>89</b>	84	89	83	87
<b>26</b>	<b>82</b>	<b>97</b>	<b>83</b>	<b>94</b>	<b>82</b>	<b>92</b>	81	<b>90</b>	86	<b>89</b>	80	88	80	87
<b>27</b>	89	98	87	95	85	<b>92</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>79</b>	<b>89</b>	<b>78</b>	<b>87</b>	<b>75</b>	<b>86</b>
<b>30</b>	86	<b>97</b>	88	<b>94</b>	83	<b>92</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	80	<b>89</b>	79	88	77	<b>86</b>

**Tabla 3.24.** Resultados de los niveles directos ( $SPL_D$ ) y niveles totales ( $SPL_T$ ).  
Sombreado lila: valores máximos. Sombreado celeste: valores mínimos.

### Consideraciones respecto al nivel directo:

- Con el aumento de la frecuencia se produce una ligera disminución del nivel sonoro directo en todas las posiciones.
- A bajas frecuencias existe una distribución más uniforme del nivel en todo el recinto, presentando una diferencia de 12 dB entre el nivel más alto y el más bajo en la banda de 125 Hz respecto a las altas frecuencias, donde encontramos una diferencia de 17 dB en 8 KHz.
- La posición con más nivel a lo largo de todo el rango de frecuencias es la número 2, por ser el punto de medida más próximo al escenario del Auditorio y estar cerca del eje de máxima radiación de la fuente sonora.
- A bajas frecuencias los puntos con menor nivel son los que se encuentran más alejados de la fuente, siendo la posición 26 la más representativa de este hecho. Sin embargo, conforme aumenta la frecuencia, las posiciones de menor nivel se hallan en los palcos (posiciones 27 y 30). El efecto de la directividad se acrecienta al incrementar la frecuencia y, por tanto, al alejarnos del eje de máxima radiación la caída de nivel es más acusada.

**Consideraciones respecto al nivel total:**

- Al igual que sucedía con el nivel directo, el nivel total disminuye levemente según aumenta la frecuencia.
- A bajas frecuencias existe en el recinto una distribución más uniforme del nivel sonoro. En la banda de 125 Hz se presenta una diferencia de 2 dB entre el nivel máximo y mínimo, mientras que en la banda de 8 kHz esta aumenta hasta los 7 dB.
- La posición que recibe un mayor nivel sonoro a lo largo de todo el rango de frecuencias es la número 2, por ser el punto de medida más próximo al escenario del Auditorio y estar cerca del eje de máxima radiación de la fuente sonora.
- A bajas y medias frecuencias, los puntos con menor nivel se concentran en el anfiteatro (posiciones 9, 15, 17, 19 y 26) y en los palcos (posiciones 27 y 30) mientras que para altas frecuencias, debido a la mayor directividad de la fuente sonora, estos se focalizan en los palcos y en menor medida en la posición 9.

**Comparación entre ambos niveles:**

- El nivel total tiene una distribución más uniforme en cuanto a sus valores máximos y mínimos frente a la del nivel directo. En el segundo caso, la diferencia entre ambos oscila entre los 12 y los 17 dB, mientras que la de los niveles totales varían entre 2 y 7 dB.
- En las zonas cercanas a la fuente sonora se está en condiciones de espacio libre ya que predomina claramente el nivel de sonido directo frente al reverberante, produciéndose una caída del nivel de 6 dB con el cuadrado de la distancia. Por eso, al recibirse pocas reflexiones en los puntos contenidos en esta área, la escasa contribución del nivel reverberante repercute en que el nivel total sea prácticamente el mismo que el directo.
- En posiciones lejanas, donde la distancia entre la fuente sonora y el receptor es muy grande respecto a la longitud de onda de la frecuencia considerada, tiene mayor presencia el nivel reverberante, el cual permanece constante.

### 4.3.9. Relación nivel directo-reverberante, D/R Ratio

Este parámetro indica la proporción de sonido directo frente al reverberante en términos de dB.

$$D/R \text{ Ratio (dB)} \begin{cases} > 0 \rightarrow SPL_D > SPL_R \\ = 0 \rightarrow SPL_D = SPL_R \\ < 0 \rightarrow SPL_D < SPL_R \end{cases}$$

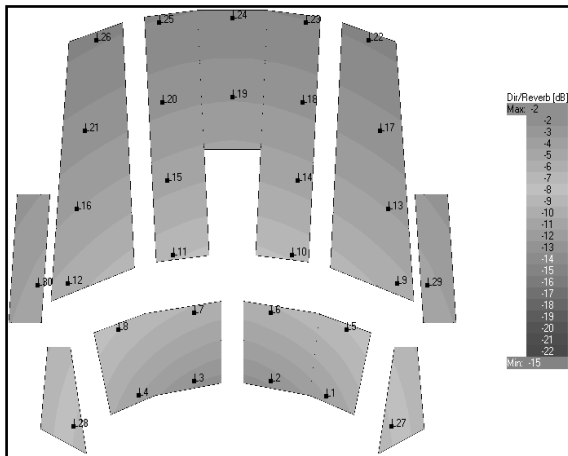


Figura 3.29. Gráfica del D/R Ratio a 125 Hz en EASE.

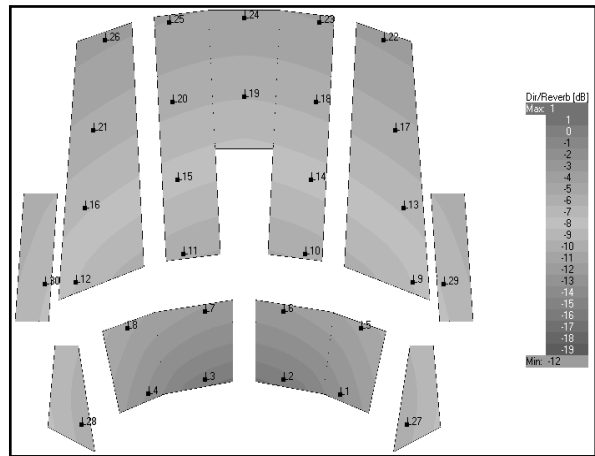


Figura 3.30. Gráfica del D/R Ratio a 250 Hz en EASE.

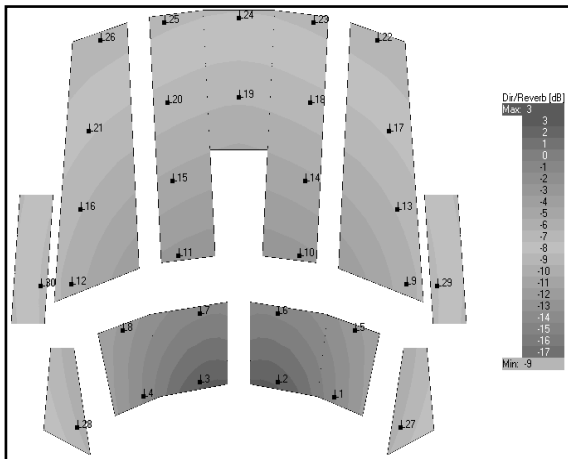


Figura 3.31. Gráfica del D/R Ratio a 500 Hz en EASE.

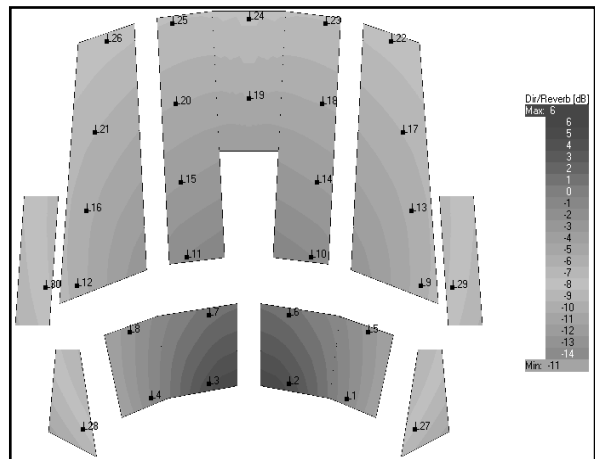
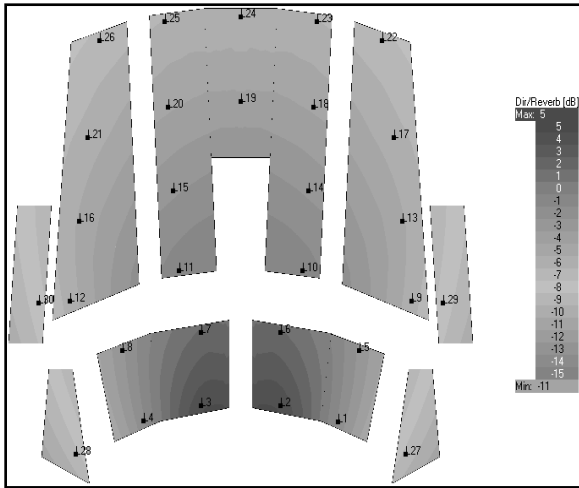
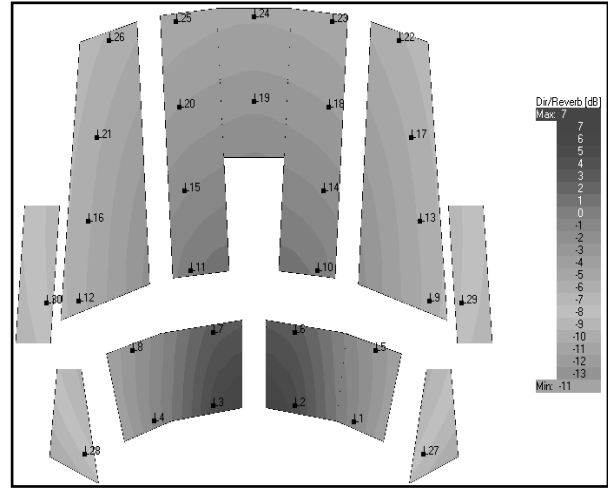


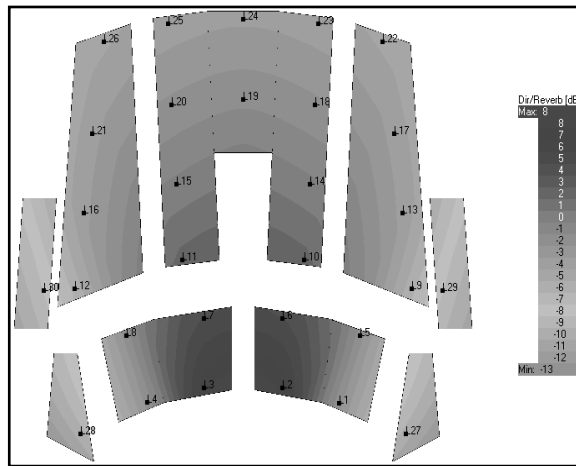
Figura 3.32. Gráfica del D/R Ratio a 1 KHz en EASE.



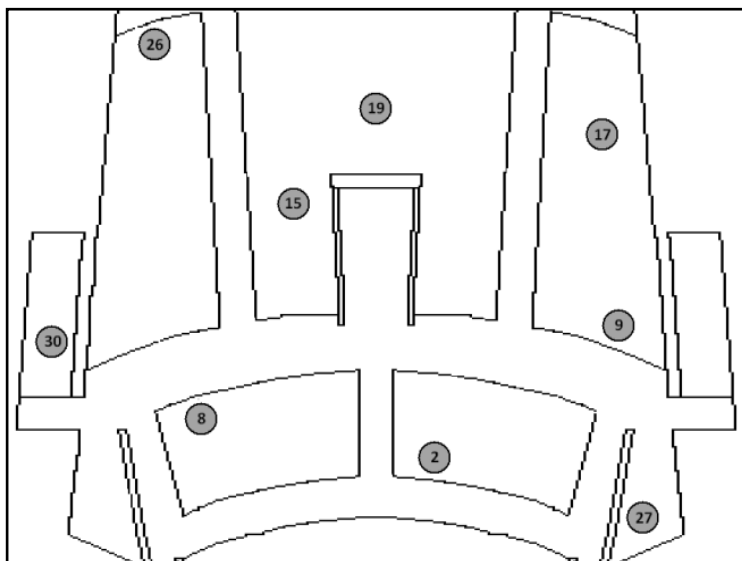
**Figura 3.33.** Gráfica del D/R Ratio a 2 KHz en EASE.



**Figura 3.34.** Gráfica del D/R Ratio a 4 KHz en EASE.



**Figura 3.35.** Gráfica del D/R Ratio a 8 KHz en EASE.



**Figura 3.36.** Detalle de las posiciones de medida.

La **tabla 3.25** recoge los resultados obtenidos:

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]						
		125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K
2	D/R Ratio [dB]	-3	0	2	4	4	5	7
8		-8	-5	-3	-3	-3	-3	-2
9		-10	-8	-6	-6	-6	-6	-6
15		-11	-8	-5	-4	-2	-2	0
17		-13	-10	-8	-7	-5	-6	-4
19		-13	-10	-7	-5	-3	-3	-2
26		-15	-12	-9	-8	-6	-6	-5
27		-8	-6	-6	-8	-9	-8	-10
30		-11	-9	-7	-8	-8	-8	-8

**Tabla 3.25.** Resultados del D/R Ratio en EASE.

Sombreado verde:  $SPL_D > SPL_R$ . Sombreado amarillo:  $SPL_D = SPL_R$ . Resto:  $SPL_D < SPL_R$

El nivel directo supera al nivel reverberante exclusivamente en la posición número 2 a medias y altas frecuencias. Estos niveles se igualan en la posición 2 para la banda de 250 Hz y en la posición 15 para la de 8 kHz. En el resto de valores presentados por la tabla el nivel reverberante predomina sobre el directo, demostrándose nuevamente que al alejarnos del escenario aumenta la contribución del primero de ellos.

#### 4.3.10. Distancia crítica, $D_c$

La distancia crítica es aquella para la cual la intensidad del campo directo es igual a la del campo reverberante [13]. Según establece el *software* EASE, los valores presentados en las gráficas de este parámetro se clasifican según este criterio:

$$\text{Distancia crítica} \begin{cases} > 1 \rightarrow SPL_D < SPL_R \\ = 1 \rightarrow SPL_D = SPL_R \\ < 1 \rightarrow SPL_D > SPL_R \end{cases}$$

A continuación, se exponen dichas gráficas:

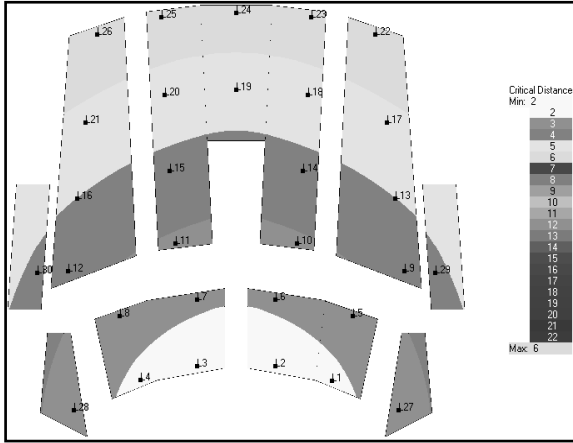


Figura 3.37. Distancia crítica a 125 Hz en EASE.

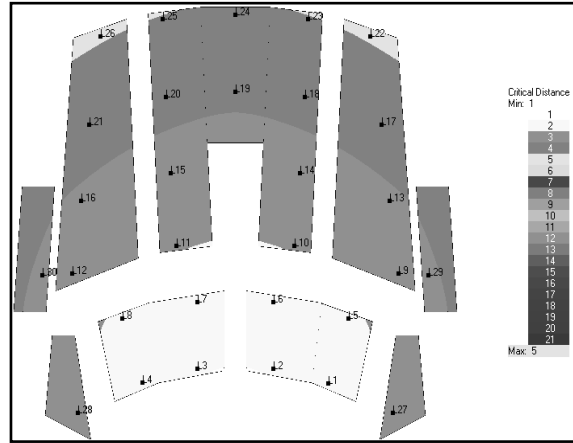


Figura 3.38. Distancia crítica a 250 Hz en EASE.

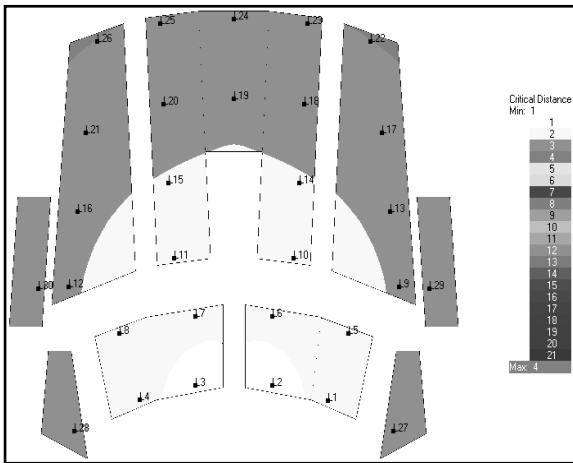


Figura 3.39. Distancia crítica a 500 Hz en EASE.

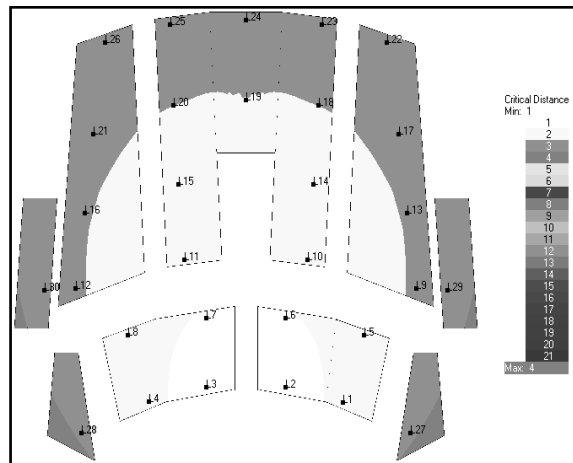


Figura 3.40. Distancia crítica a 1 KHz en EASE.

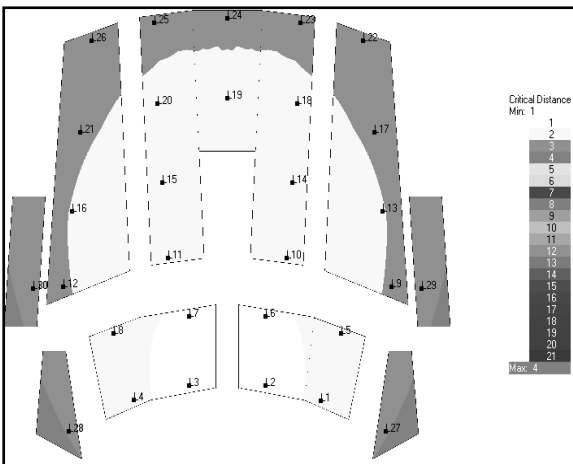


Figura 3.41. Distancia crítica a 2 KHz en EASE.

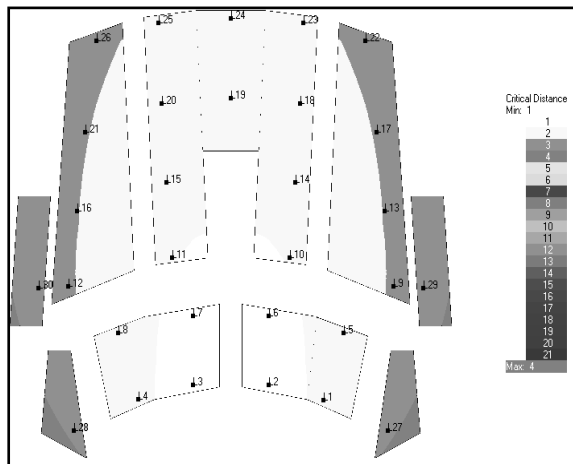


Figura 3.42. Distancia crítica a 4 KHz en EASE.

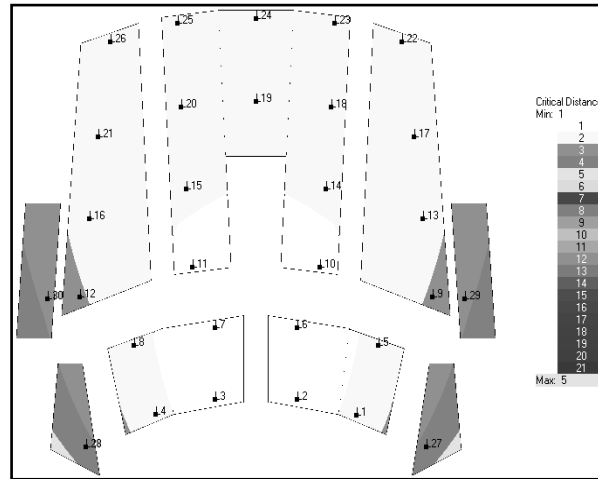


Figura 3.43. Distancia crítica a 8 KHz en EASE.

Los valores presentados en las anteriores gráficas se resumen en la siguiente tabla:

Posición	Parámetro	Frecuencia [Hz]						
		125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K
2	D <sub>c</sub>	2	2	1	1	1	1	1
8		3	2	2	2	2	2	2
9		4	3	3	3	3	3	3
15		4	3	2	2	2	2	2
17		5	4	3	3	3	3	2
19		5	4	3	2	2	2	2
26		6	5	3	3	3	3	2
27		3	3	3	3	3	3	4
30		4	3	3	3	3	3	3

Tabla 3.26. Resultados de la Distancia crítica en EASE.  
Sombreado amarillo:  $SPL_D = SPL_R$ . Resto:  $SPL_D < SPL_R$ .

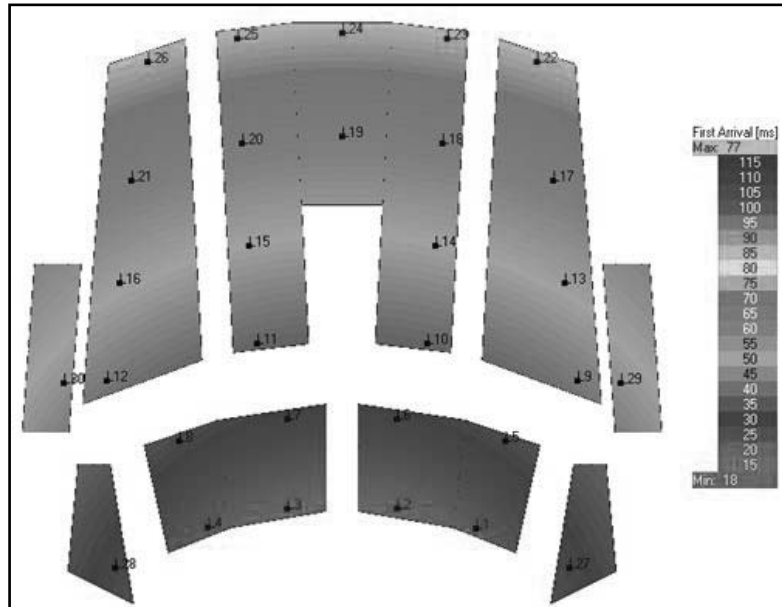
En concordancia con el criterio previamente expuesto, solamente aparecen igualados los niveles directo y reverberante para las frecuencias medias y altas de la posición de medida número 2. En todos los demás casos el nivel sonoro reverberante supera al directo.

Se percibe también que conforme se incrementa la frecuencia, el nivel sonoro reverberante va disminuyendo debido a que las altas frecuencias son absorbidas con mayor rapidez por las distintas superficies del recinto.

Comparando estos datos con los resultados obtenidos del análisis de la D/R Ratio, se observa que existe una elevada correlación entre ambos parámetros.

### 4.3.11. Tiempo de llegada del sonido directo, *First Arrival Time*

En la **figura 3.44** se reflejan los tiempos de llegada del sonido directo a las distintas áreas de audiencia.



**Figura 3.44.** Gráfica del tiempo de llegada del sonido directo en EASE.

A continuación, en la **tabla 3.27**, se muestran los tiempos de las posiciones de medidas seleccionadas.

Posición	Parámetro	
2	First Arrival Time [ms]	18
8		31
9		41
15		49
17		61
19		61
26		74
27		27
30		46

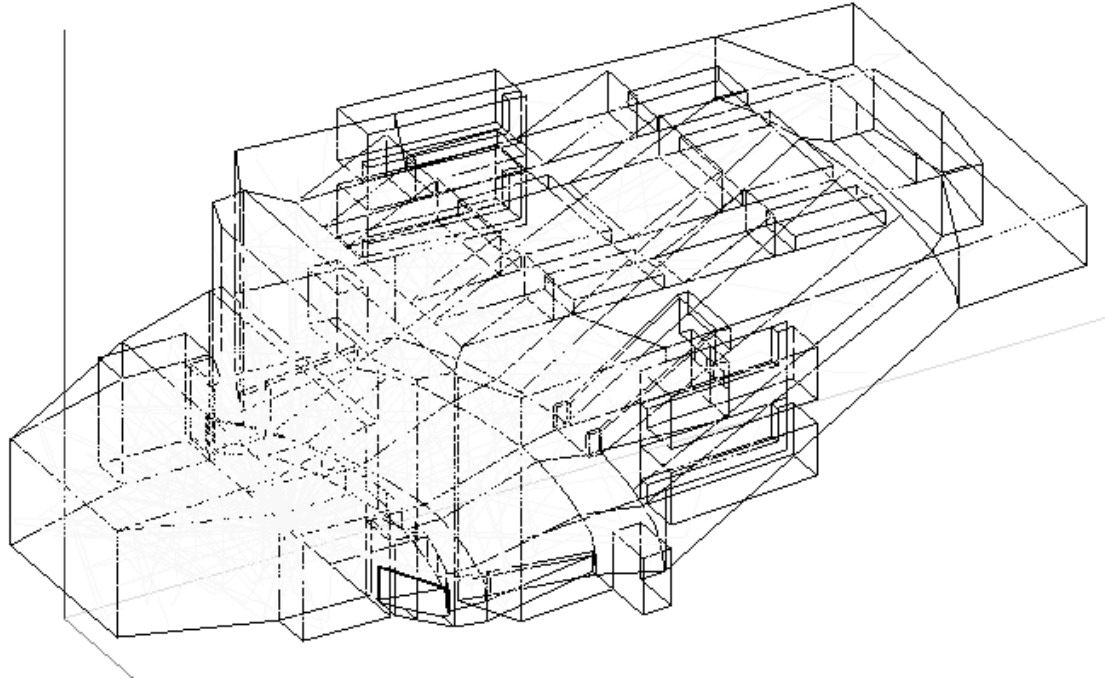
**Tabla 3.27.** Resultados del tiempo de llegada del sonido directo en EASE.

El tiempo de llegada del sonido directo en cada punto de escucha aumenta con la distancia entre la fuente y el oyente.



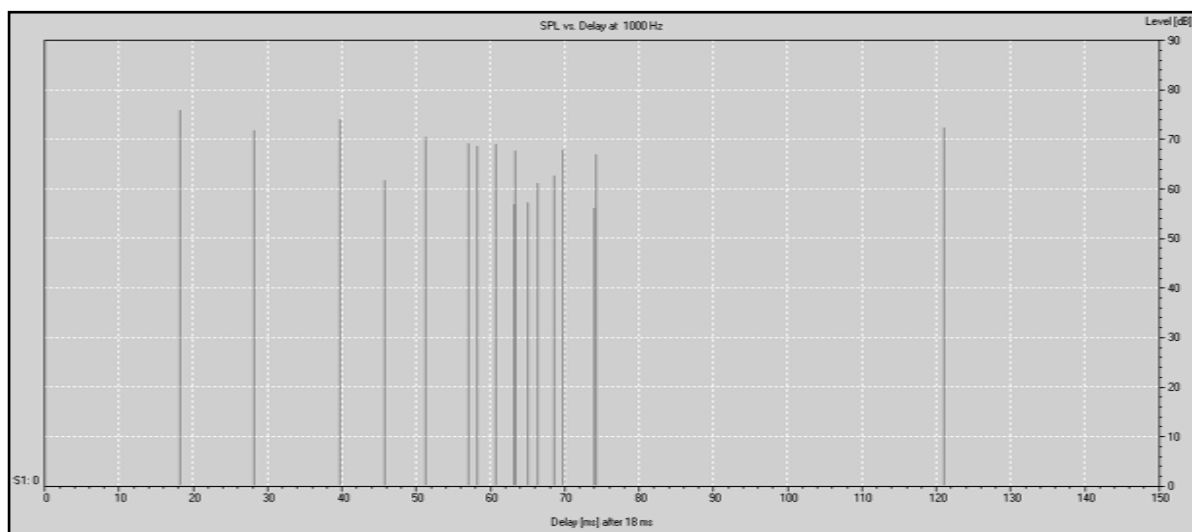
### 4.3.12. Estudio de reflectogramas. Criterio de Doak & Bolt

En este apartado se procede al análisis de los rayos que inciden en cada una de las posiciones dentro de los primeros 150 ms a partir de la llegada del sonido directo.

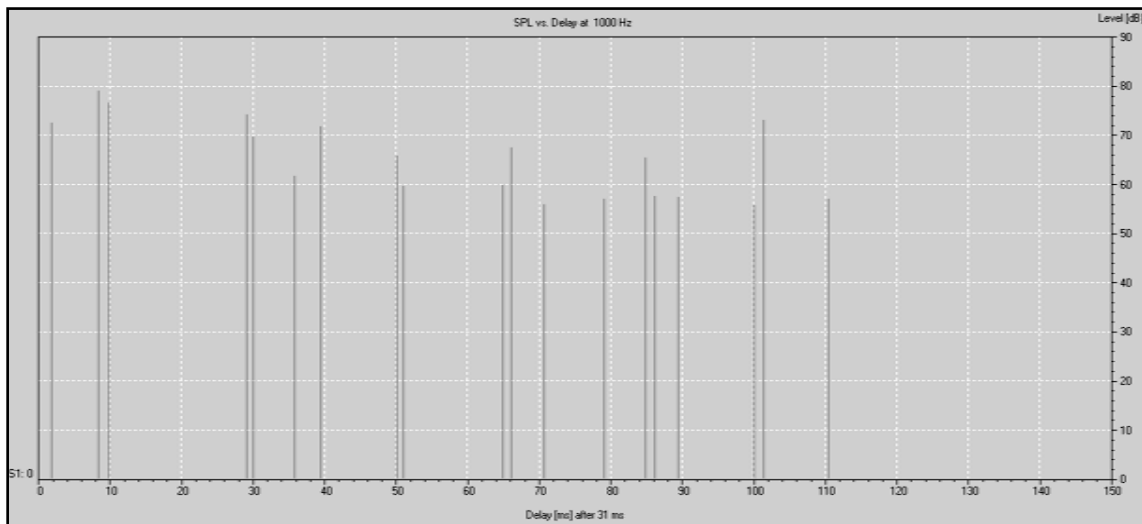


**Figura 3.45.** Representación de los rayos emitidos por la fuente en los primeros 150 ms.

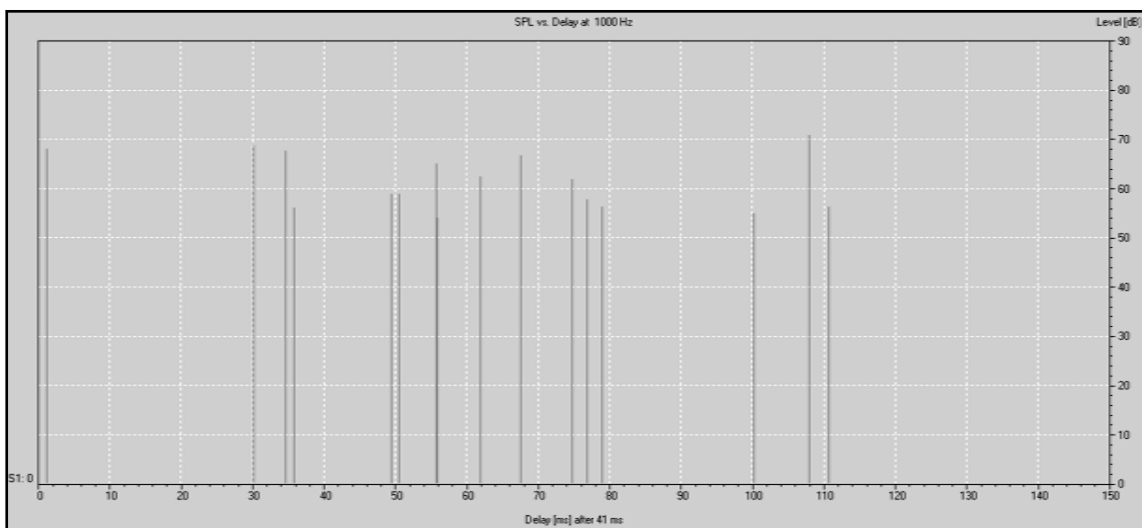
A continuación, se exponen los reflectogramas (a 1 KHz) correspondientes a cada una de las posiciones de medida.



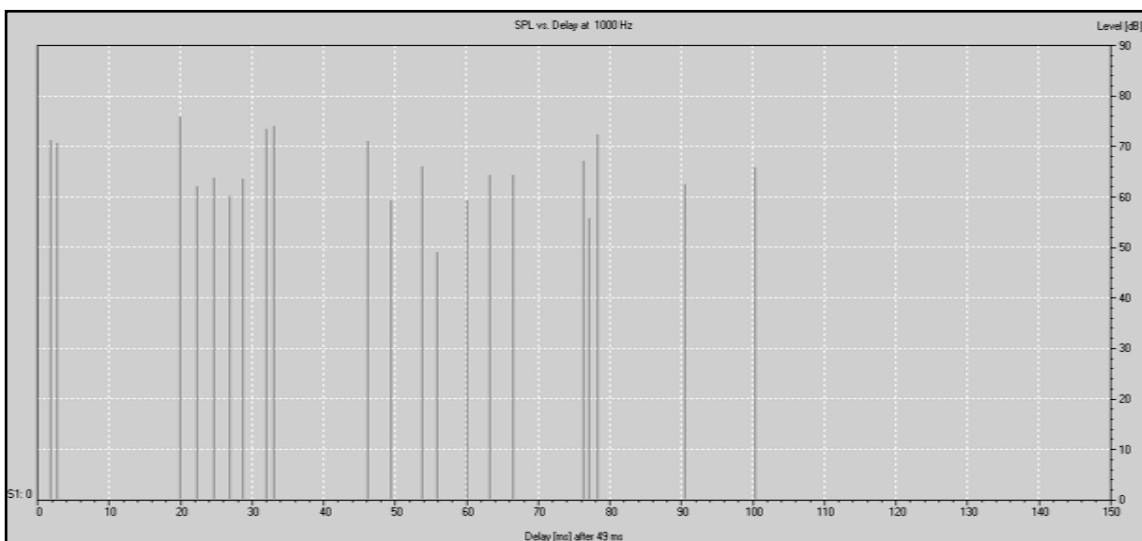
**Figura 3.46.** Reflectograma de la posición número 2.



**Figura 3.47.** Reflectograma de la posición número 8.



**Figura 3.48.** Reflectograma de la posición número 9.



**Figura 3.49.** Reflectograma de la posición número 15.

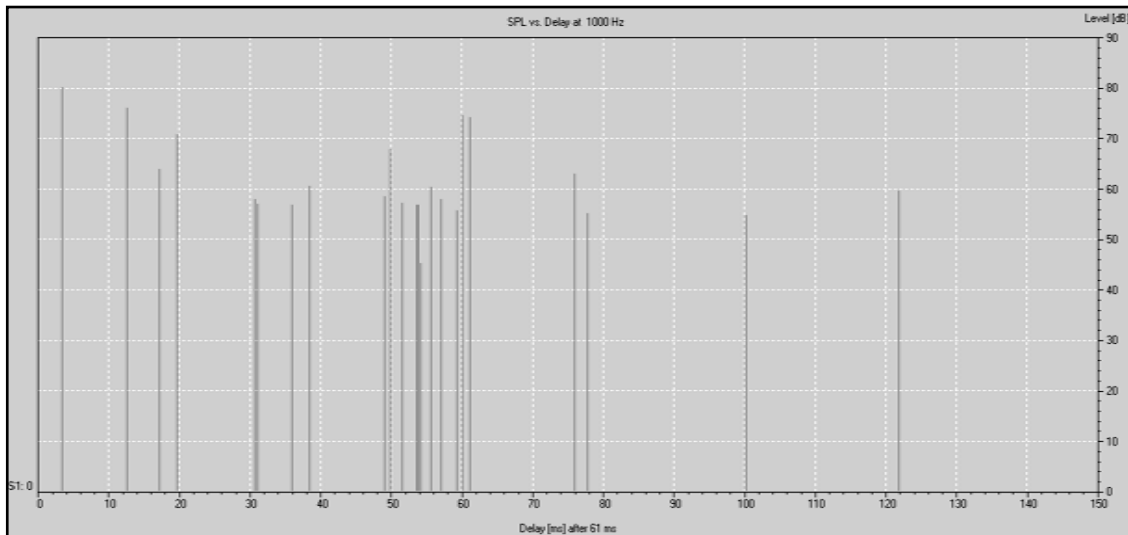


Figura 3.50. Reflectograma de la posición número 17.

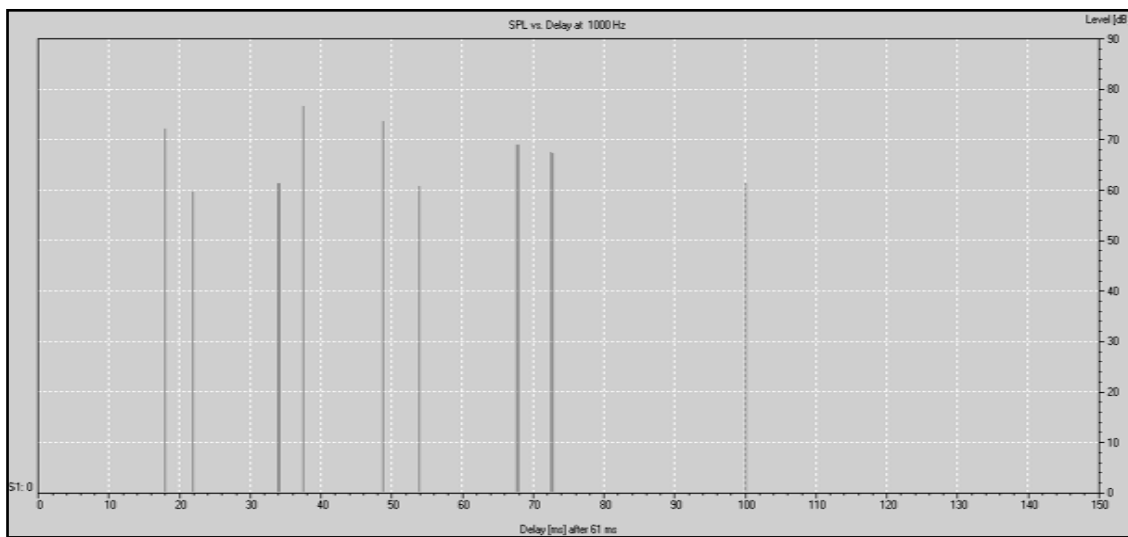


Figura 3.51. Reflectograma de la posición número 19.

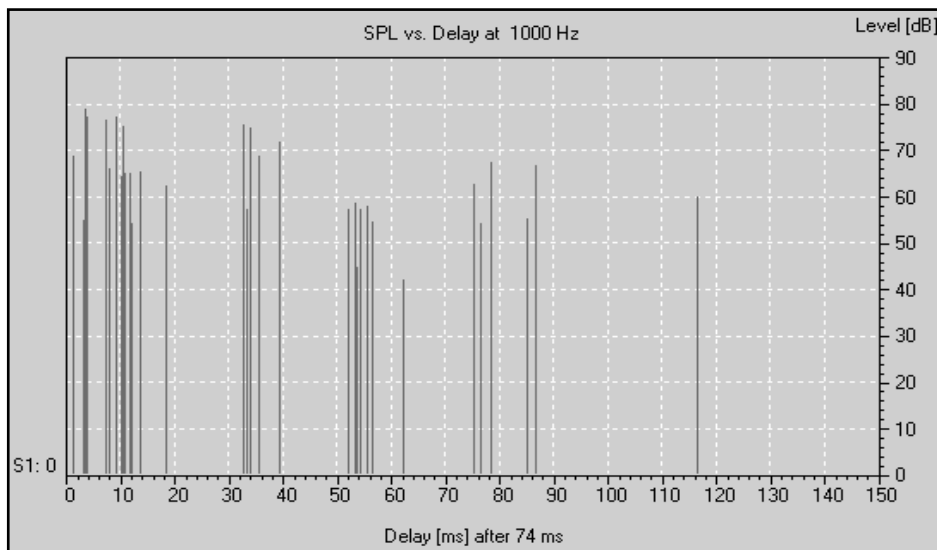
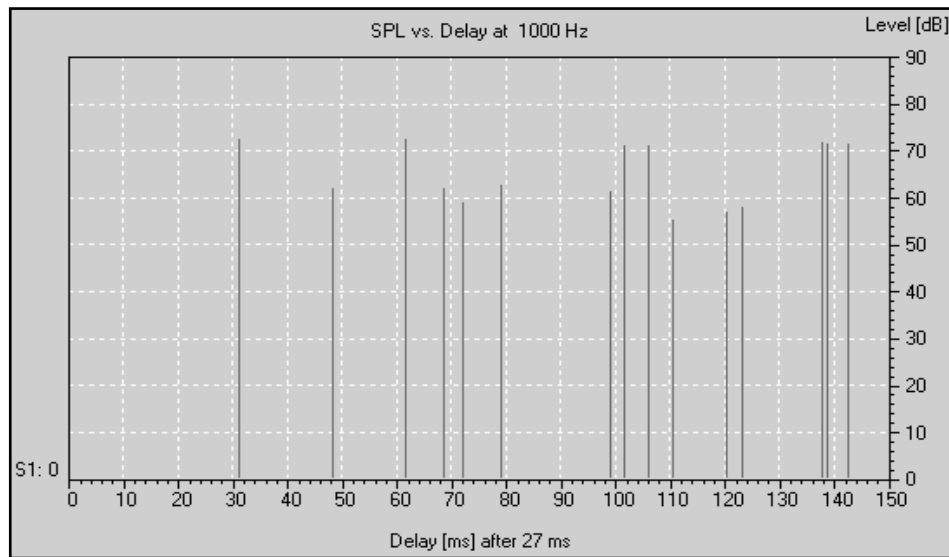
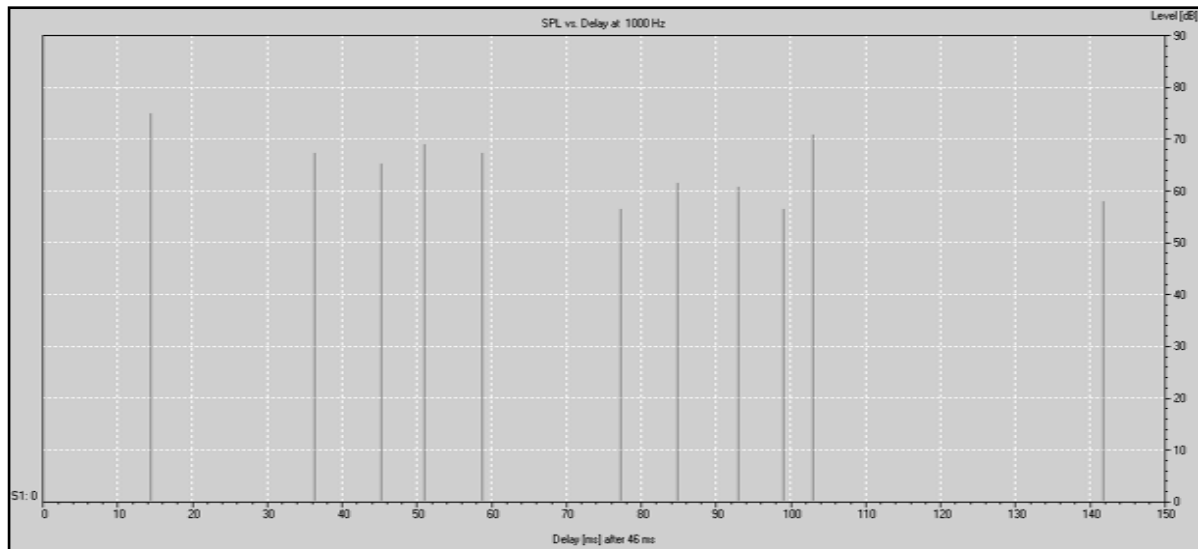


Figura 3.52. Reflectograma de la posición número 26.



**Figura 3.53.** Reflectograma de la posición número 27.



**Figura 3.54.** Reflectograma de la posición número 30.

De las gráficas anteriores se obtienen los niveles sonoros y los tiempos de llegada de las distintas reflexiones que alcanzan a cada uno de los puntos de escucha. Estos dos parámetros permiten aplicar el criterio de Doak & Bolt (**fig. 3.55**) para determinar si las reflexiones son molestas o no para los oyentes.

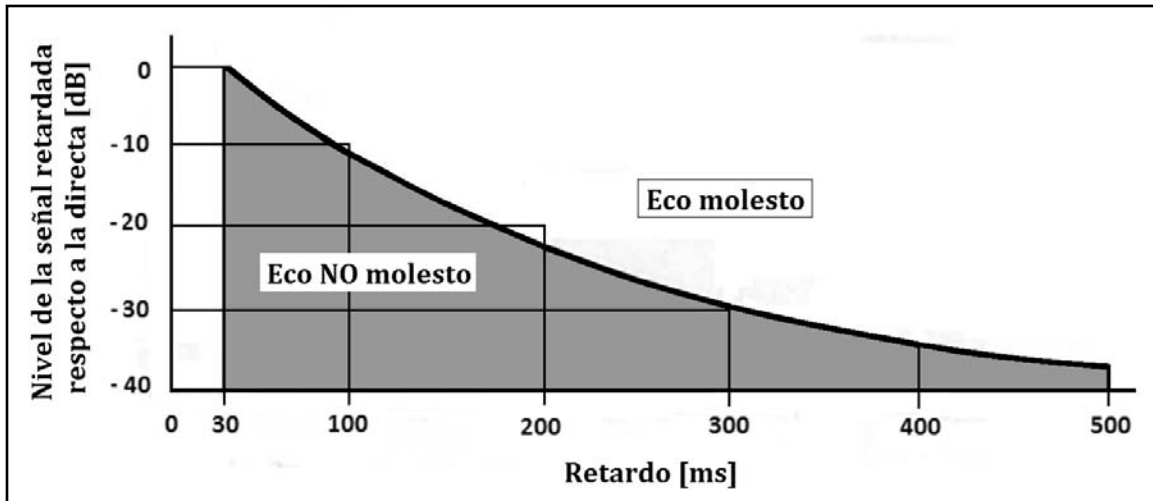


Figura 3.55. Gráfica del criterio de Doak & Bolt.

En la siguiente **tabla 3.28** se recogen los resultados obtenidos tras haber analizado las reflexiones en cada posición de medida. Se ha tenido en cuenta los niveles de sonido directo en la banda de frecuencia de 1 kHz recogidos en la **tabla 3.24**.

Posición	Nivel sonido directo [dB]	Nivel reflexión más molesta [dB]	Diferencia de niveles [dB]	Tiempo de llegada reflexión más molesta [ms]	Valoración
2	93	73	-20	121	No molesto
8	86	73	-13	102	No molesto
9	84	71	-13	108	No molesto
15	83	66	-17	100	No molesto
17	82	76	-6	60	No molesto
19	83	61	-22	100	No molesto
26	81	60	-21	116	No molesto
27	80	72	-8	142	Molesto
30	80	71	-9	103	Molesto

Tabla 3.28. Cálculo de ecos molestos según el criterio de Doak & Bolt.

Una vez realizados los cálculos pertinentes y aplicada la curva del criterio de Doak & Bolt, se concluye que únicamente las posiciones 27 y 30 se ven afectadas por reflexiones molestas.

## PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA

A continuación se detallan los resultados alcanzados tras el análisis de las muestras sonoras registradas. Para facilitar la lectura y la comprensión de la información brindada esta se organiza en los siguientes cinco bloques:

- Estudio de los armónicos.
- Efecto de la doble caída en las envolventes.
- Influencia de la dinámica.
- Efectos de la acción de los pedales.
- Estudio de la directividad del instrumento.

En cada apartado se indican los registros sonoros empleados en la investigación especificando la numeración de las pistas del CD de audio correspondientes a cada uno de ellos. En el **Anexo III.B** se puede consultar la relación completa de los archivos de audio contenidos en el CD. Este incluye muchas muestras sonoras que no han sido expresamente analizadas en esta Memoria pero que ayudan a ampliar la base de datos sonoros sobre el instrumento.

### 4.4. Estudio de los armónicos

#### 4.5.1. Introducción

Tal y como se desarrolla en el epígrafe 2.2 del **Anexo I.C**, una cuerda tensa sujeta por sus dos extremos vibrará a una frecuencia periódica denominada fundamental y, además, a una serie de frecuencias superiores denominadas armónicos hasta que la energía que los hace ascender a lo largo de la serie disminuye y queda reducida a cantidades despreciables. Estos sonidos de resonancia superior que acompañan a un sonido fundamental ( $f_1$ ) se organizan mediante la siguiente expresión:  $f_n = nf_1$  siendo  $n = 1, 2, \dots, n$ . Esto implica que la frecuencia del 2º armónico será el doble que la del fundamental, la del 3º, el triple, y así sucesivamente.

Trasladando estos cálculos al plano musical, y teniendo en cuenta que en un intervalo de octava (por ejemplo, el formado por las alturas Do1 y Do2) la frecuencia del armónico superior (Do2) siempre será el doble de la del inferior (Do1), se resuelve que la formación de la serie armónica corresponde a la siguiente relación de intervalos:

Intervalo	Relación	Intervalo musical	Intervalos con importantes desafinaciones	Ejemplo		
b : a				Nota musical	Nº de armónico	Cents de desafinación
<b>Frecuencia fundamental</b>				<b>Do1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
2 : 1	2	<b>8ª Justa</b>		Do2	2	0
3 : 2	1,5	<b>5ª Justa</b>		Sol2	3	+2
4 : 3	1,(3)	<b>4ª Justa</b>		Do3	4	0
5 : 4	1,25	<b>3ª Mayor</b>		Mi3	5	-14
6 : 5	1,2	<b>3ª menor</b>		Sol3	6	+2
7 : 6	1,1(6)	3ª menor	*	Sib3	7	-31
8 : 7	≈ 1,143	2ª Mayor		Do4	8	0
9 : 8	1,125	<b>2ª Mayor</b>		Re4	9	+4
10 : 9	1,(1)	2ª Mayor		Mi4	10	-14
11 : 10	1,1	2ª Mayor	*	Fa#4	11	-41
12 : 11	1,(09)	2ª menor	*	Sol4	12	+2
13 : 12	1,08(3)	2ª menor	*	Lab4	13	+41
14 : 13	≈ 1,077	2ª Mayor	*	Sib4	14	-31
15 : 14	≈ 1,071	2ª menor	*	Si4	15	-12
16 : 15	1,0(6)	<b>2ª menor</b>		Do5	16	0

**Tabla 3.29.** Intervalos constitutivos de la serie armónica. Ejemplo de notas resultantes siendo Do1 la altura fundamental.

### 4.5.2. Descripción del método analítico

Para llevar a cabo el estudio se selecciona una muestra de 9 notas musicales a lo largo de la extensión del instrumento (véase **tabla 3.29** y **figura 3.56**). Estas son interpretadas en una dinámica *forte* con el objetivo de excitar el mayor número posible de parciales superiores, manteniendo pulsada la tecla correspondiente hasta la extinción del sonido generado.

Muestras sonoras empleadas en el estudio de los armónicos		
Notas musicales	Frecuencia	Pistas CD audio
<b>La 0</b>	27,5 Hz	001
<b>Do1</b>	32,7 Hz	002
<b>Do2</b>	65,4 Hz	004
<b>Do3</b>	130,8 Hz	006
<b>Do4</b>	261,6 Hz	008
<b>Do5</b>	523,3 Hz	010
<b>Do6</b>	1046,5 Hz	012
<b>Do7</b>	2093,0 Hz	014
<b>Do8</b>	4186,0 Hz	016

**Tabla 3.30.** Frecuencias de las notas musicales elegidas para estudiar sus armónicos.

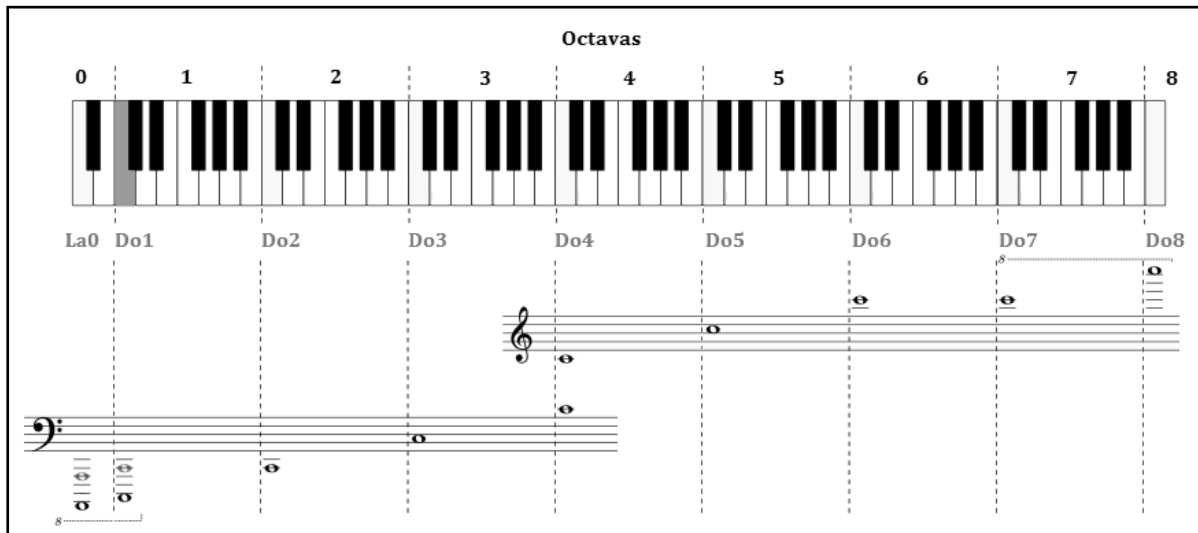


Figura 3.56. Notas musicales seleccionadas para estudiar sus armónicos.

### 4.5.3. Resultados obtenidos

#### 4.5.3.1. Visión general a lo largo del registro del instrumento

A continuación se exponen los espectrogramas de cada una de las alturas elegidas. Estas representaciones gráficas muestran la distribución energética existente en cada nota musical en función del tiempo (eje X) y de la frecuencia (eje Y). Los niveles sonoros se plasman según una escala de colores donde el color negro representa la ausencia de sonido y el color amarillo los máximos niveles alcanzados.

En las gráficas se señalan los primeros armónicos de cada nota, indicando su nombre (por ejemplo, Sol2) y su número ( $n=3$ , considerando la altura fundamental Do1).

- **Nota musical: La0**

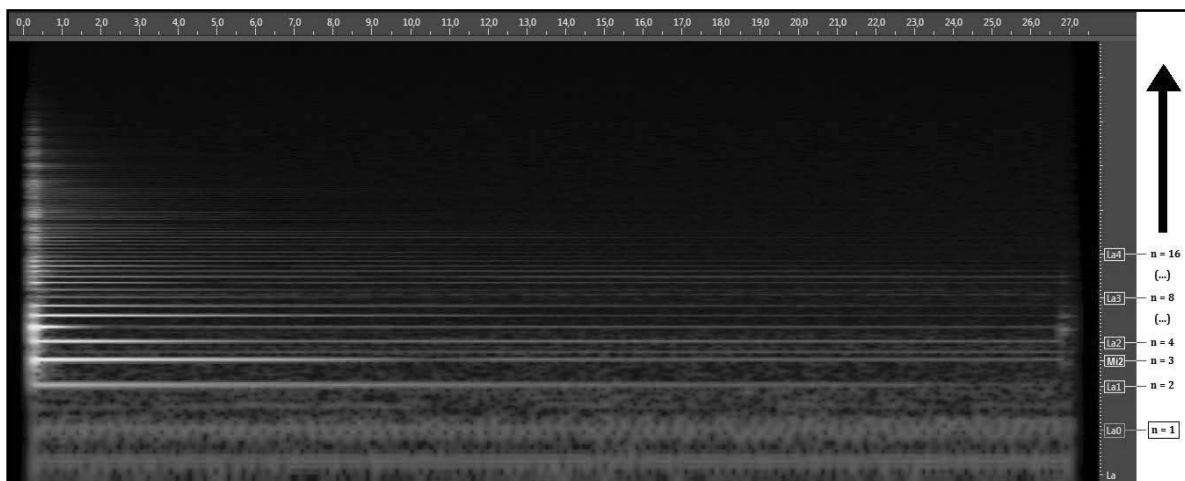


Figura 3.57. Espectrograma general de la nota La0.



▪ Nota musical: Do1

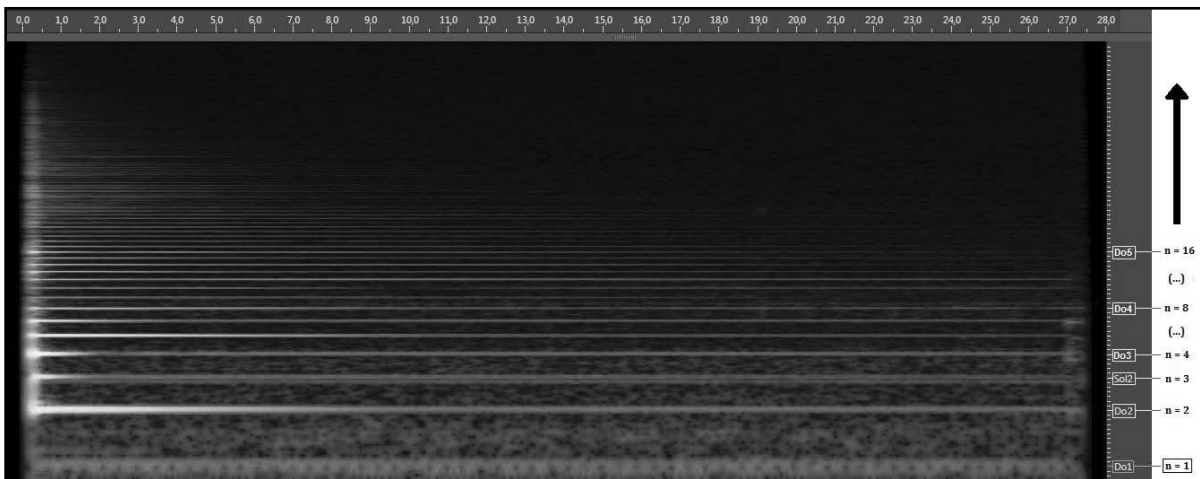


Figura 3.58. Espectrograma general de la nota Do1.

▪ Nota musical: Do2

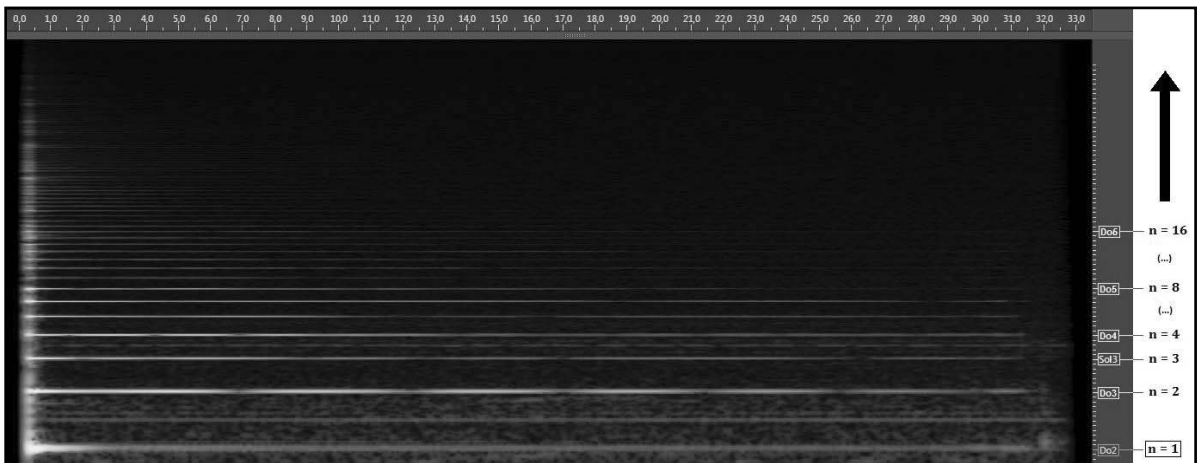


Figura 3.59. Espectrograma general de la nota Do2.

▪ Nota musical: Do3

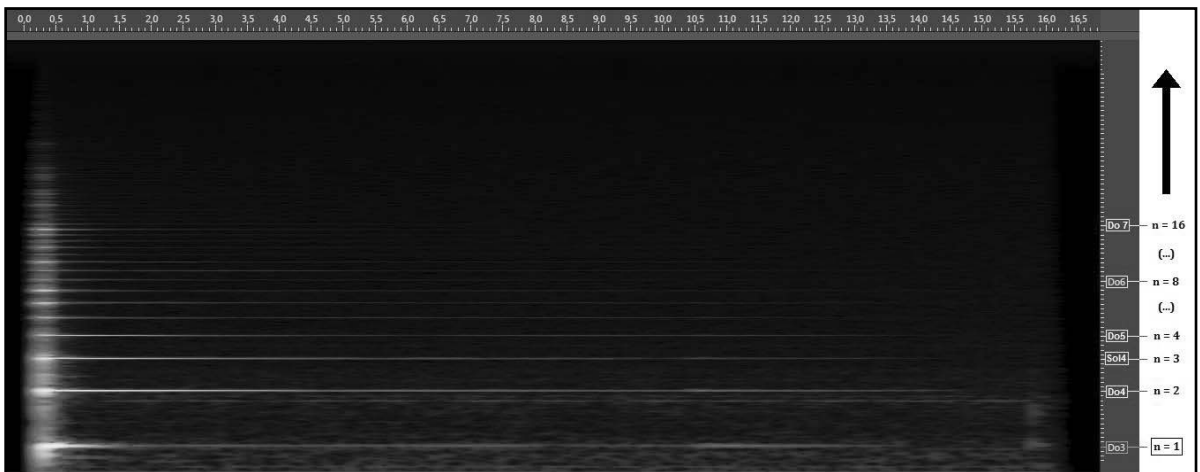


Figura 3.60. Espectrograma general de la nota Do3.

▪ Nota musical: Do4

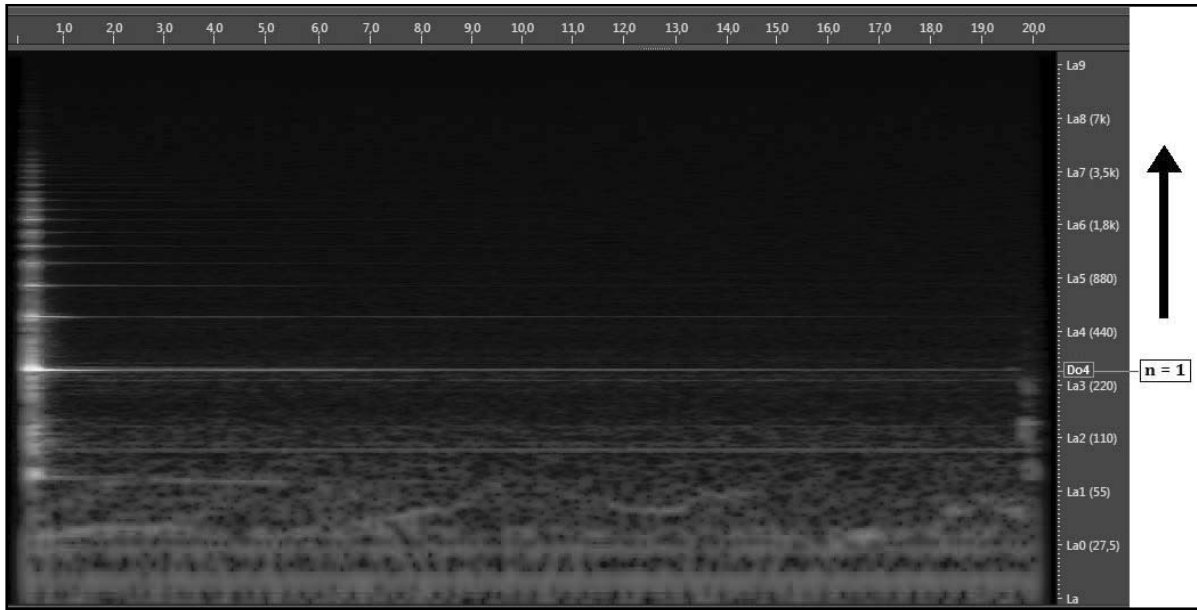


Figura 3.61. Espectrograma general de la nota Do4.

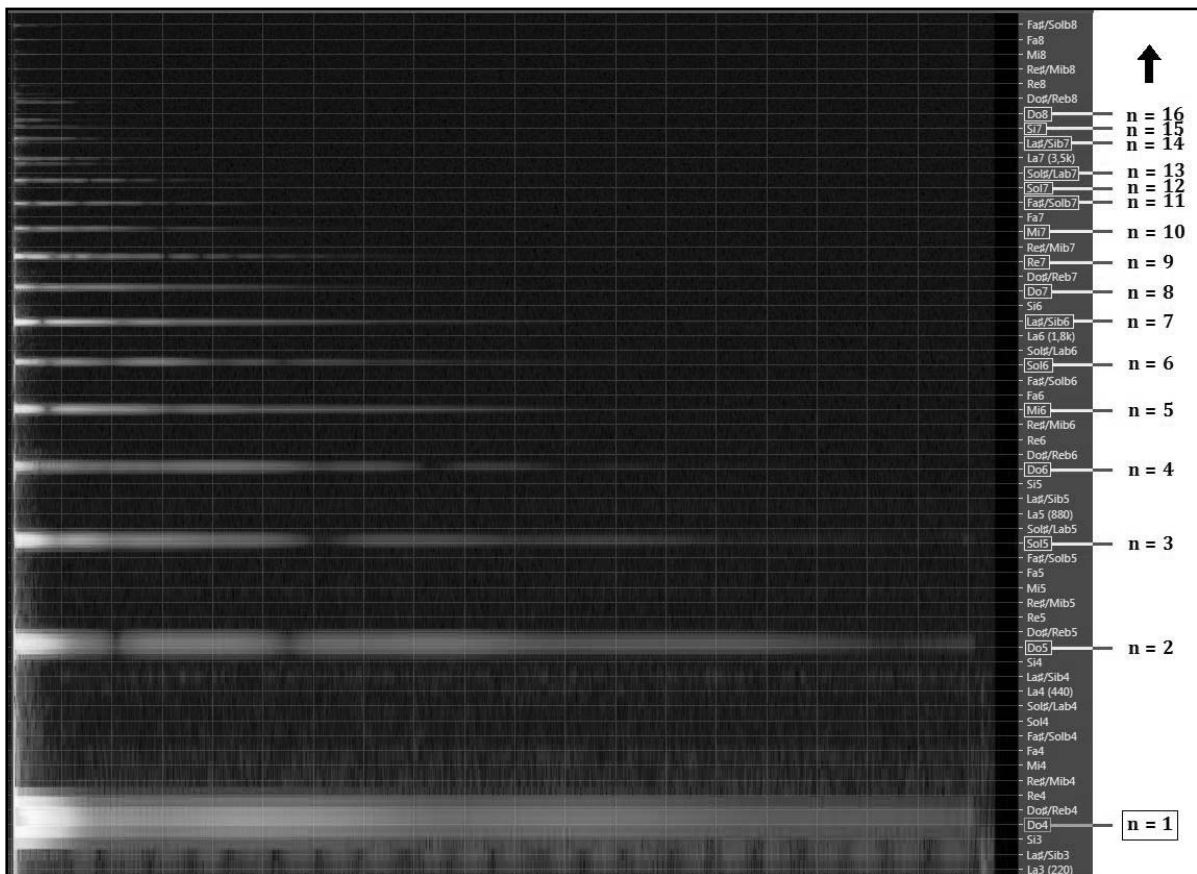


Figura 3.62. Detalle del espectrograma de la nota musical Do4.

▪ Nota musical: Do5

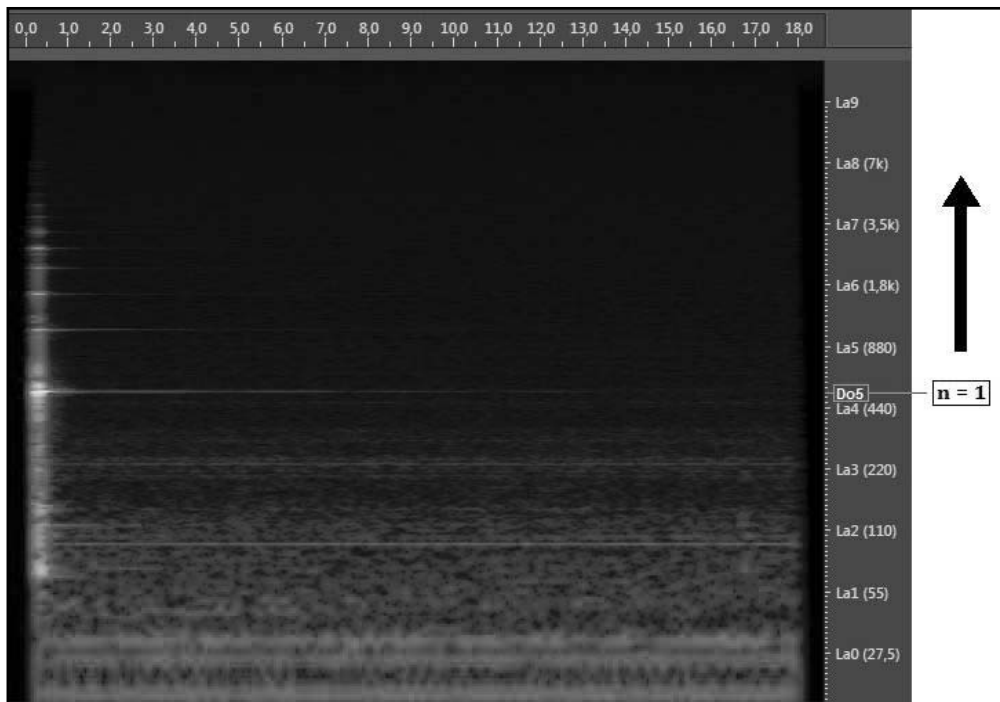


Figura 3.63. Espectrograma general de la nota Do5.

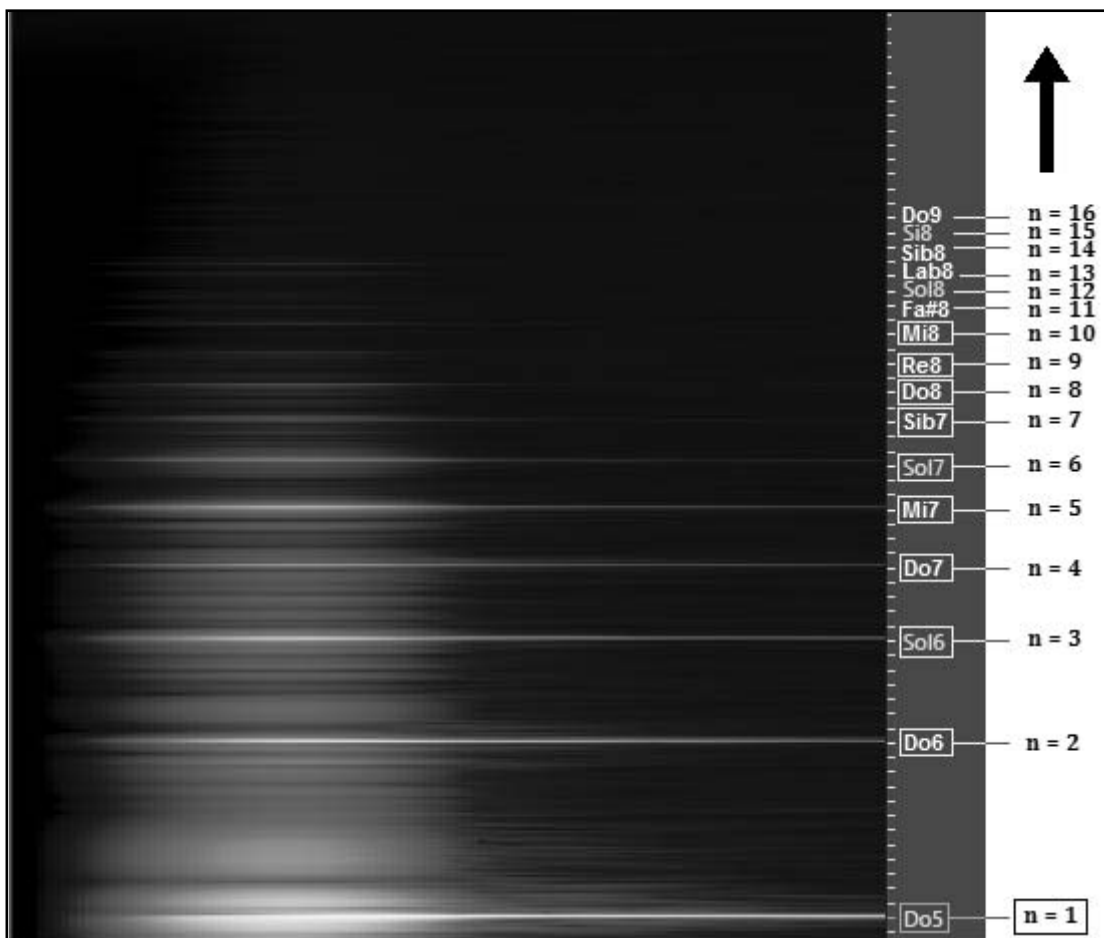


Figura 3.64. Detalle del espectrograma de la nota musical Do5.

- Nota musical: Do6

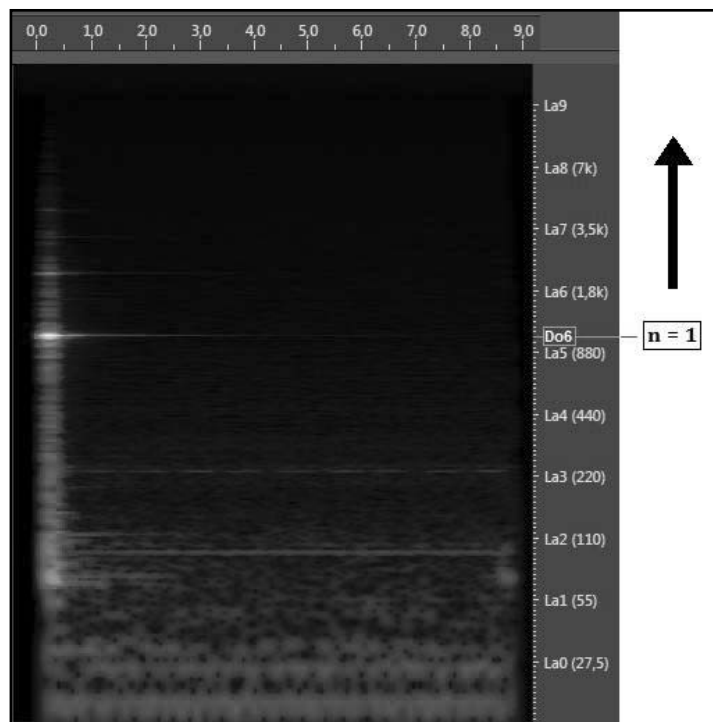


Figura 3.65. Espectrograma general de la nota Do6.

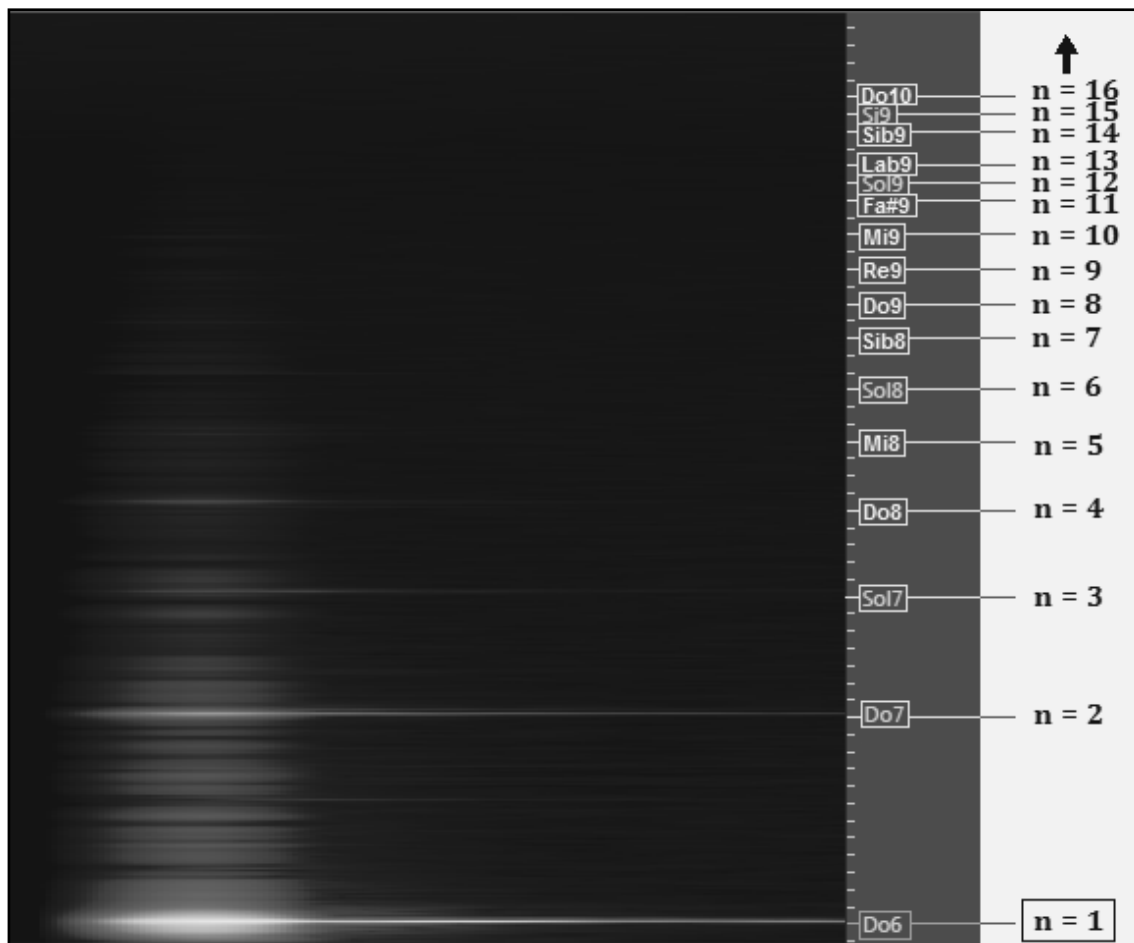


Figura 3.66. Detalle del espectrograma de la nota musical Do6.

▪ Nota musical: Do7

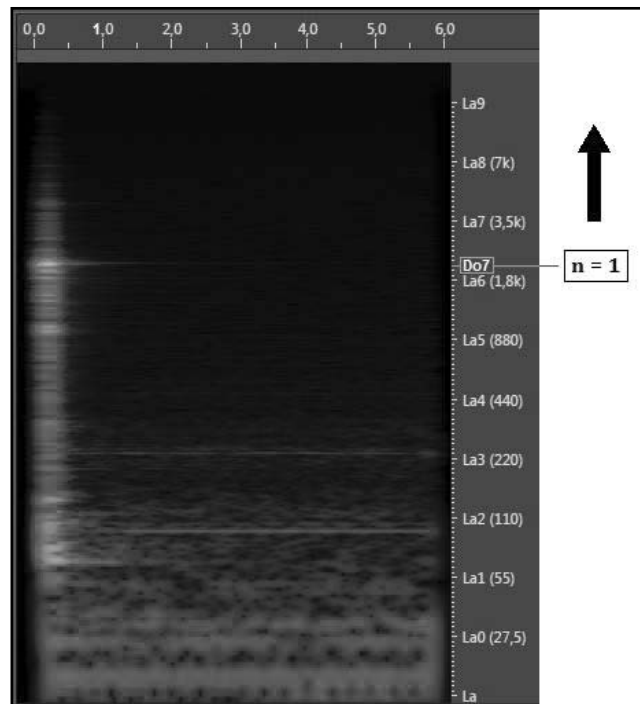


Figura 3.67. Espectrograma general de la nota musical Do7.

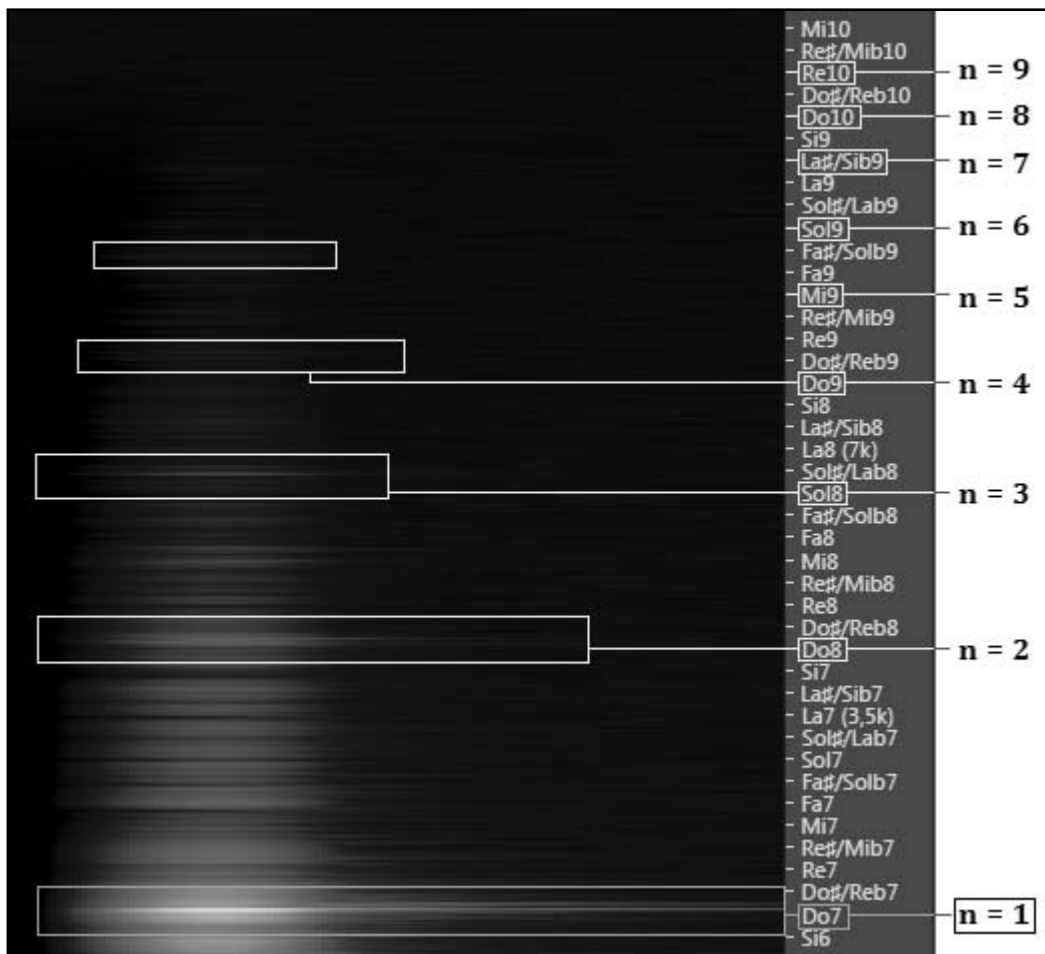


Figura 3.68. Detalle del espectrograma de la nota musical Do7.

- Nota musical: Do8

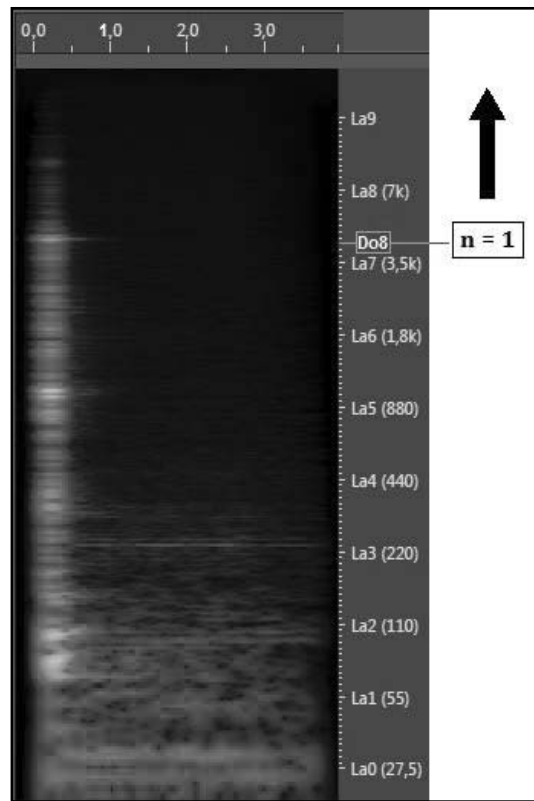


Figura 3.69. Espectrograma general de la nota musical Do8.

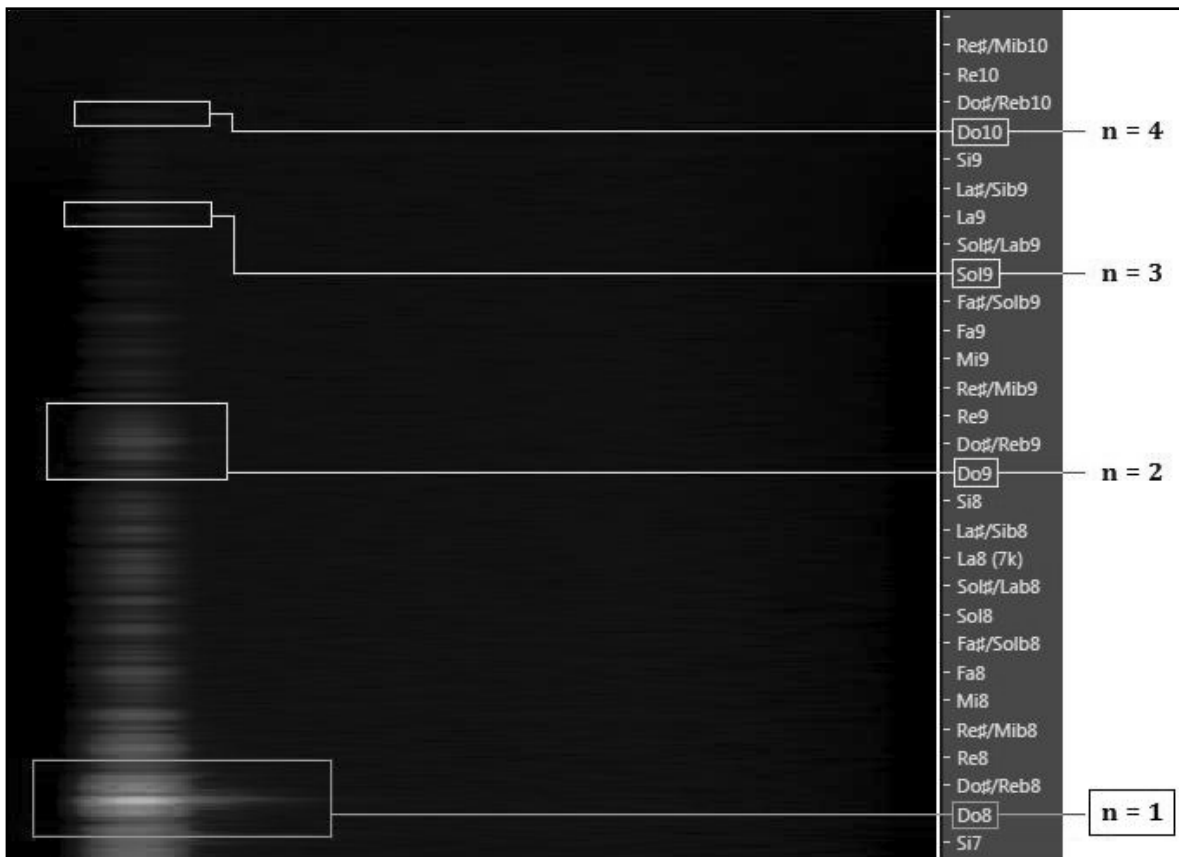


Figura 3.70. Detalle del espectrograma de la nota musical Do8.

### 4.5.3.2. Análisis de la serie armónica de Do1

En la siguiente figura se muestran las notas musicales correspondientes a los primeros 16 parciales de la serie armónica de Do1 = 32,7 Hz (altura fundamental).

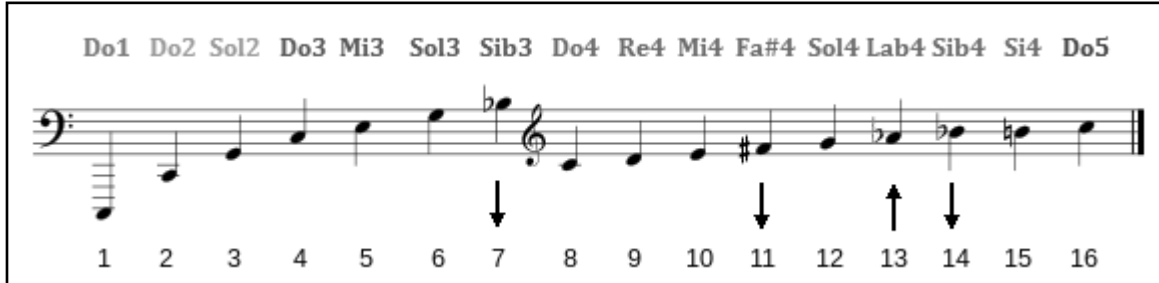


Figura 3.71. Serie armónica: 16 primeros armónicos de Do1.

En la línea del estudio llevado a cabo por Fletcher, Blackham y Stratton (1962) [25], se realiza una comparación entre los valores teóricos de las frecuencias de los armónicos correspondientes a una altura fundamental (en este caso, Do1) y los obtenidos del análisis de las muestras sonoras registradas.

Los autores anteriores exploraron de forma exhaustiva las componentes frecuenciales de ciertas notas musicales interpretadas en un piano vertical. En la figura 3.72 se detallan los primeros 49 armónicos de la altura fundamental La0 = 27,5 Hz (n=1), especificando para cada uno de ellos: el número de parcial [n], la frecuencia teórica que debería tener aplicando la ecuación:  $f_n = nf_1$  siendo n= 1, 2,... n [27,5n], la frecuencia medida [obs $f_n$ ], la frecuencia calculada teniendo en cuenta el coeficiente de inarmonía [calc $f_n$ ] y el nivel sonoro relativo [dB].

n	27.5n	obs $f_n$	calc $f_n$	db	n	27.5n	obs $f_n$	calc $f_n$	db
1	27.5	27.5	27.51	-23	26	715	835	833	-17
2	55	55	55.06	-29	27	742.5	876	874	-16
3	82.5	83	82.2	-9	28	770	917	916	-7
4	110	111	110.5	-19	29	797.5	959	959	-9
5	137.5	138	138.4	0	30	825	1003	1003	-18
6	165	166	166.5	-3	31	852.5	1049	1047	-23
7	192.5	193	195	-15	32	880	1094	1093	-25
8	220	222	224	-28	33	907.5	1144	1140	-33
9	247.5	251	253	-22	34	935	1189	1187	-16
10	275	281	282	-12	35	962	1237	1236	-11
11	302.5	311	312	-13	36	990	1287	1286	-17
12	330	340	342	-3	37	1017.5	1336	1337	-26
13	357.5	371	373	-3	38	1045	1386	1388	-28
14	385	402	404	-7	39	1072.5	1440	1441	-31
15	412.5	435	436	-11	40	1100	1495	1495	-33
16	440	467	469	-15	41	1127.5	1550	1550	-27
17	467.5	501	502	-8	42	1155	1602	1607	-34
18	495	534	535	-4	43	1182.5	1659	1664	-29
19	522.5	569	570	0	44	1210	1716	1722	-31
20	550	605	605	+4	45	1237.5	1776	1782	-36
21	577.5	641	641	0	46	1265	1834	1842	-38
22	605	677	678	-1	47	1292.5	1884	1904	-33
23	623.5	715	716	-6	48	1320	1940	1967	...
24	660	753	754	-21	49	1347.5	1997	2031	-37
25	687.5	793	793	-25					

Figura 3.72. Frecuencias de los parciales de la nota La0. Coeficiente de inarmonía: B=0,00053 [25].

Serie armónica (Nota fundamental: Do1 = 32,7 Hz)													
Parcial	Teoría						Medición						
	Frecuencias musicales [FMu]		Frecuencias (según $f_n=nf_1$ )	Intervalos y sus relaciones teóricas		Desviación entre frecuencias	Frecuencias medidas	Intervalos y sus relaciones (según los datos de FMe)		Frecuencias (según $f_n=nf_1$ )	Desviación entre frecuencias		
n	Nota musical	Frec.	[FTeo1]			[FMu - FTeo1]	[FMe]			[FTeo2]	[FMe - FTeo2]	[FMu - FMe]	
1	Do 1	32,7 Hz	$f_1= 32,7$ Hz	8ª Justa		0,0 Hz	$f_1= 32,8$ Hz	8ª Justa		$f_1= 32,8$ Hz	0,0 Hz	0 cents	- 0,1 Hz
2	Do 2	65,4 Hz	$2f_1= 65,4$ Hz	(2:1) = $\underline{2}$		0,0 Hz	$f_2= 65,9$ Hz	$\underline{2,009 \approx 2}$		$2f_1= 65,6$ Hz	- 0,3 Hz	8 cents	- 0,5 Hz
3	Sol 2	98,0 Hz	$3f_1= 98,1$ Hz	4ª Justa		- 0,1 Hz	$f_3= 98,3$ Hz	4ª Justa		$3f_1= 98,4$ Hz	+ 0,1 Hz	2 cents	- 0,3 Hz
4	Do 3	130,8 Hz	$4f_1= 130,8$ Hz	(4:3) = $\underline{1,3}$		0,0 Hz	$f_4= 131,3$ Hz	$\underline{1,336 \approx 1,3}$		$4f_1= 131,2$ Hz	- 0,1 Hz	1 cent	- 0,5 Hz
5	Mi 3	164,8 Hz	$5f_1= 163,5$ Hz	3ª Mayor		+ 1,3 Hz	$f_5= 164,2$ Hz	3ª menor		$5f_1= 164,0$ Hz	- 0,2 Hz	2 cents	+ 0,6 Hz
6	Sol 3	196,0 Hz	$6f_1= 196,2$ Hz	(6:5) = $\underline{1,2}$		- 0,2 Hz	$f_6= 196,5$ Hz	3ª menor *		$6f_1= 196,8$ Hz	+ 0,3 Hz	3 cents	- 0,5 Hz
7	Si b 3	233,1 Hz	$7f_1= 228,9$ Hz	2ª Mayor *		+ 4,2 Hz	$f_7= 229,4$ Hz	2ª Mayor *		$7f_1= 229,6$ Hz	+ 0,2 Hz	1 cent	+ 3,7 Hz
8	Do 4	261,6 Hz	$8f_1= 261,7$ Hz	(8:7) $\approx \underline{1,143}$		0,0 Hz	$f_8= 262,0$ Hz	$\underline{1,142 \approx 1,143}$		$8f_1= 262,4$ Hz	+ 0,4 Hz	3 cents	- 0,4 Hz
9	Re 4	293,7 Hz	$9f_1= 294,3$ Hz	2ª Mayor		- 0,6 Hz	$f_9= 294,8$ Hz	2ª Mayor		$9f_1= 295,2$ Hz	+ 0,4 Hz	2 cents	- 1,1 Hz
10	Mi 4	329,6 Hz	$10f_1= 327,0$ Hz	(10:9) = $\underline{1,1}$		+ 2,6 Hz	$f_{10}= 327,7$ Hz	$\underline{1,112 \approx 1,1}$		$10f_1= 328,0$ Hz	+ 0,3 Hz	2 cents	+ 1,9 Hz
11	Fa# 4	370,0 Hz	$11f_1= 359,7$ Hz	2ª menor *		+ 10,3 Hz	$f_{11}= 361,0$ Hz	2ª menor *		$11f_1= 360,8$ Hz	- 0,2 Hz	1 cent	+ 9,0 Hz
12	Sol 4	392,0 Hz	$12f_1= 392,4$ Hz	(12:11) = $\underline{1,09}$		- 0,4 Hz	$f_{12}= 394,5$ Hz	$\underline{1,093 \approx 1,09}$		$12f_1= 393,6$ Hz	- 0,9 Hz	4 cents	- 2,5 Hz
13	La b 4	415,3 Hz	$13f_1= 425,1$ Hz	2ª Mayor *		- 9,8 Hz	$f_{13}= 427,3$ Hz	2ª menor *		$13f_1= 426,4$ Hz	- 0,9 Hz	4 cents	- 12,0 Hz
14	Si b 4	466,2 Hz	$14f_1= 457,8$ Hz	(14:13) $\approx \underline{1,077}$		+ 8,4 Hz	$f_{14}= 460,4$ Hz	$\underline{1,077 = 1,077}$		$14f_1= 459,2$ Hz	- 1,2 Hz	5 cents	+ 5,8 Hz
15	Si 4	493,9 Hz	$15f_1= 490,5$ Hz	2ª menor *		+ 3,4 Hz	$f_{15}= 494,0$ Hz	2ª menor		$15f_1= 492,0$ Hz	- 2,0 Hz	7 cents	- 0,1 Hz
16	Do 5	523,3 Hz	$16f_1= 523,2$ Hz	(16:15) = $\underline{1,06}$		+ 0,1 Hz	$f_{16}= 527,4$ Hz	$\underline{\approx 1,07 \approx 1,06}$		$16f_1= 524,8$ Hz	- 2,6 Hz	9 cents	- 4,1 Hz

Tabla 3.31. Comparación entre las frecuencias de la serie armónica teórica y la medida. Nota fundamental: Do1 = 32,7 Hz.



En la anterior tabla se muestra, por un lado, una serie de datos calculados teóricamente (columna de “Teoría”) y por el otro, una relación de valores obtenidos mediante el análisis del registro sonoro de Do1 (columna de “Medición”).

Si se comparan las frecuencias obtenidas del análisis de los armónicos de la nota grabada Do1 (columna: “Frecuencias medidas [FMe]”) con las teóricas que estos debieran tener (columna: “Frecuencias según  $f_n=nf_1$  [FTeo2]”) se observa como estas son muy semejantes. Tal y como se refleja en la columna “[FMe – FTeo2]”, las desviaciones presentes son muy pequeñas. El máximo valor de desviación existente corresponde a 9 cents en el armónico 16. Se recuerda que un cent equivale a una centésima parte de un semitono.

Dicha exactitud también se demuestra en la evidente correlación entre las relaciones teóricas entre los intervalos y las calculadas conforme a las frecuencias medidas.

Los intervalos modelo (y sus correspondientes relaciones) aparecen sombreados en color amarillo. Los que están sombreados en color lila contienen un cierto grado de desafinación y son, por tanto, aproximaciones a los intervalos más cercanos.

En las columnas “[FMu – FTeo1]” y “[FMu – FMe]” se resaltan en color las desviaciones más relevantes que presentan las frecuencias teóricas y medidas de los armónicos respecto a las frecuencias de las notas musicales recogidas en la columna “[FMu]”. Estas desviaciones son especialmente notables en los armónicos 7, 11, 13 y 14, y en menor medida, en el 5, 10 y 15.

#### 4.5.4. Discusión de los resultados

A continuación en la **tabla 3.32** se muestra una síntesis de las particularidades que caracterizan la formación de las series armónicas tomando diferentes notas fundamentales a lo largo de la tesitura del instrumento.

El límite superior del espectro de audiofrecuencia se fija en 20 KHz. Por lo tanto, la última altura musical incluida en él es Mib10 = 19.912 Hz, quedando la siguiente nota Mi10 = 21.096 Hz fuera de la demarcación establecida.

Comparativa de las características de las series armónicas a lo largo del registro del piano					
Nota musical Fundamental	Frecuencia [Hz]	Nº de armónicos posibles dentro del espectro audible	Armónico de mayor nivel sonoro		Resto de armónicos ordenados de mayor a menor nivel sonoro
			n	Nota musical	
<b>La0</b>	27,5 Hz	Aprox. 1216	3	Mi2	4, 2, 11, 6, 12, 7, <b>1</b> , 5, 10, 20, 14, 18, 13, 21, 22, 15, 8, 9, ...
<b>Do1</b>	32,7 Hz	Aprox. 608	2	Do2	5, 10, 4, 7, <b>1</b> , 6, 3, 14, 12, 11, 9, 13, 15, 8, ...
<b>Do2</b>	65,4 Hz	Aprox. 304	2	Do3	4, 6, 3, <b>1</b> , 5, 7, 11, 9, 14, 10, 13, 15, 12, 8, 18, 16, ...
<b>Do3</b>	130,8 Hz	Aprox. 152	2	Do4	3, 7, 6, 4, <b>1</b> , 9, 5, 10, 8, 12, 16, 14, 13, 11, 15, ...
<b>Do4</b>	261,6 Hz	Aprox. 76	<b>1</b>	Do4	2, 3, 5, 7, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 15, ...
<b>Do5</b>	523,3 Hz	38		Do5	2, 3, 5, 4, 6, 7, 8, 10, 9, 13, ...
<b>Do6</b>	1.046,5 Hz	19		Do6	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 9, ...
<b>Do7</b>	2.093,0 Hz	9		Do7	2, 3, 4, 5, 6, ...
<b>Do8</b>	4.186,0 Hz	4		Do8	2, 3, 4

**Tabla 3.32.** Comparativa de las series armónicas a lo largo del registro del piano.

En cuanto a la distribución energética de una altura sonora, lo habitual es que sus primeros armónicos tengan una mayor amplitud y contengan más energía que los de menor índice, y que esta disminuya progresivamente a lo largo de la serie armónica.

No obstante, existen excepciones localizadas en las notas de bajas frecuencias. Tal y como se recoge en la anterior tabla, en los sonidos más graves estudiados (La0, Do1, Do2 y Do3), el armónico de mayor nivel no es el fundamental. En el caso de La0 es su tercer armónico y en el de Do1, Do2 y Do3 su segundo armónico. A pesar de ello, el oído percibe la altura correcta del sonido gracias a que reconstruye la frecuencia fundamental de este a partir del resto de armónicos. Como se ha comprobado tras realizar un minucioso análisis de los armónicos de la nota Do1, estos están correctamente afinados lo que hace posible que el oído humano reconstruya la altura fundamental sin mayores problemas.

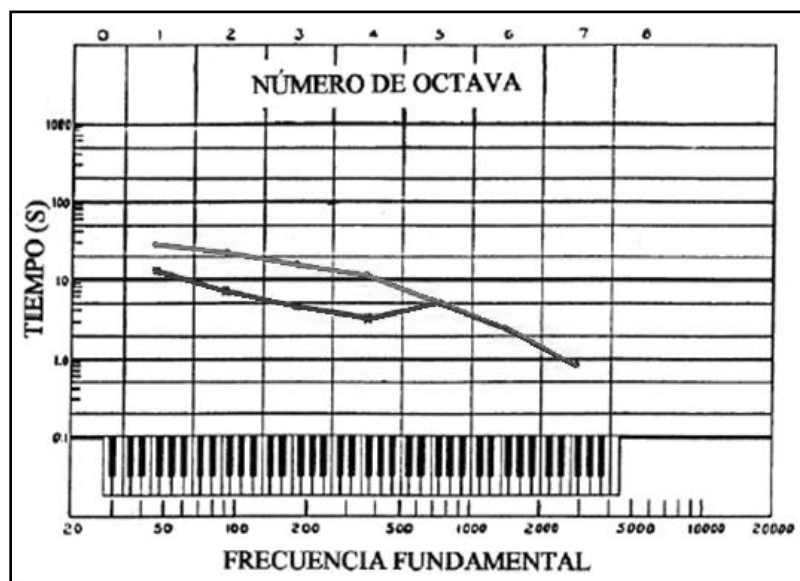
Además, se observa como a medida que las alturas fundamentales son más graves si se comparan dos armónicos consecutivos el segundo de ellos no siempre tiene una menor amplitud sonora que el primero. Por ejemplo el 5º armónico de Do2 tiene mayor nivel que su 4º armónico.

## 4.6. Efecto de la doble caída en las envolventes

### 4.6.1. Introducción

Tal y como se describe en el epígrafe 4.1.6 del **Anexo I.C**, al estudiar la evolución temporal de la amplitud de las notas del piano (considerando que se mantiene pulsada la tecla hasta que el sonido se extinga) se observa que generalmente existen dos fases en la caída del sonido. La primera de ellas, que recibe el nombre de sonido inmediato, tiene poca duración y una tasa de atenuación elevada. La segunda constituye la resonancia, un período más largo con una atenuación del nivel de presión acústica más progresiva. Este particular comportamiento del sonido del piano tiene su origen fundamentalmente en la utilización de dobles y triples cuerdas, aunque también influye la existencia de dos direcciones de vibración o polarizaciones en cada una de ellas [8].

D. W. Martin en su artículo “Decay rates in piano tones” [4] publicado en el año 1947 presenta la gráfica recogida en la **figura 3.73**. En ella, se muestran las diferencias de pendiente existentes entre la caída del sonido inmediato y la del sonido de resonancia en las diferentes octavas del instrumento. En este caso, los datos corresponden a un piano de media cola. Cuanto más separadas están las líneas roja y azul más abrupto es el cambio de pendiente y, por tanto, más evidente resulta el efecto de la doble caída de la envolvente. Cuando ambas líneas convergen en una sola, situación que se observa en el registro agudo, se presupone que la envolvente presenta una sola pendiente de caída.



**Figura 3.73.** Gráfica del efecto de la doble caída de las envolventes a lo largo del registro del piano [4].  
 Línea roja: muestra el tiempo en segundos que tardaría el sonido en disminuir 60 dB si la tasa de caída fuera siempre la del sonido de resonancia.  
 Línea azul: muestra el tiempo en segundos que tardaría el sonido en disminuir 60 dB si la tasa de caída fuera siempre la del sonido inmediato.

Interpretando la gráfica anterior se obtienen los valores que se presentan en las **tablas 3.33 y 3.34**.

	Octava 1	Octava 2	Octava 3	Octava 4	Octava 5	Octava 6	Octava 7
Línea roja [Resonancia]	30 s	22 s	15,5 s	10,2 s	5 s	2,5 s	0,8 s
Líneas azul [S. Inmediato]	12 s	7 s	4,5 s	3,5 s			

**Tabla 3.33.** Tiempo que tardaría el sonido en disminuir 60 dB si la tasa de caída fuera siempre la del sonido de resonancia o la del sonido inmediato (según lo expuesto en la gráfica de Martin (1947).

	Octava 1	Octava 2	Octava 3	Octava 4	Octava 5	Octava 6	Octava 7
Tasa caída Sonido inmediato	60dB/12s = 5 dB/s	60dB/7s = 8,6 dB/s	60dB/4,5s = 13,3 dB/s	60dB/3,5s = 17,1 dB/s	60dB/5s = 12 dB/s	60dB/2,5s = 24 dB/s	60dB/0,8s = 75 dB/s
Tasa caída Sonido de resonancia	60dB/30s = 2 dB/s	60dB/22s = 2,7dB/s	60dB/15,5s = 3,9 dB/s	60dB/10,2s = 5,9 dB/s			

**Tabla 3.34.** Tasas de caída del sonido inmediato y del sonido de resonancia (según lo expuesto en la gráfica de Martin (1947).

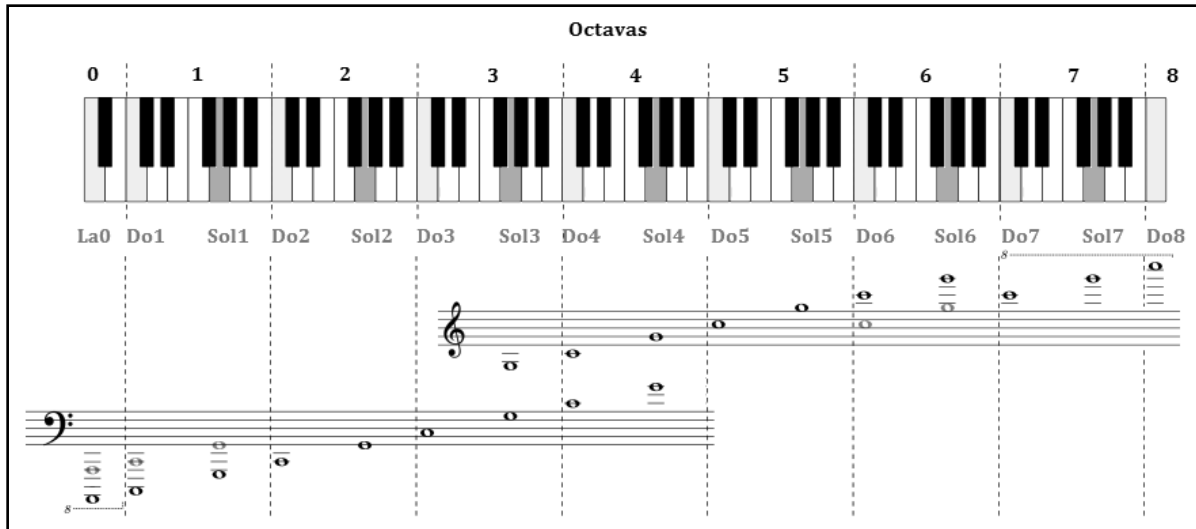
#### 4.6.2. Descripción del método analítico

Para efectuar el estudio se escoge una muestra de 16 notas musicales a lo largo de la extensión del instrumento (véase **tabla 3.35** y **figura 3.74**). Estas son interpretadas en una dinámica *forte*, con el objetivo de excitar el mayor número posible de parciales superiores, manteniendo pulsada la tecla correspondiente hasta la extinción del sonido generado.

Muestras sonoras empleadas en el estudio de la doble caída de las envolventes			
Notas musicales	Octava	Frecuencia	Pistas CD audio
La 0	0	27,5 Hz	001
Do1	1	32,7 Hz	002
Sol1		49,0 Hz	003
Do2	2	65,4 Hz	004
Sol2		98,0 Hz	005
Do3	3	130,8 Hz	006
Sol3		196,0 Hz	007
Do4	4	261,6 Hz	008
Sol4		392,0 Hz	009
Do5	5	523,3 Hz	010
Sol5		740,0 Hz	011
Do6	6	1.046,5 Hz	012
Sol6		1.568,0 Hz	013

<b>Do7</b>	7	2.093,0 Hz	014
<b>Sol7</b>		3.136,0 Hz	015
<b>Do8</b>	8	4.186,0 Hz	016

**Tabla 3.35.** Frecuencias de las notas musicales elegidas para estudiar la doble caída de sus envolventes.



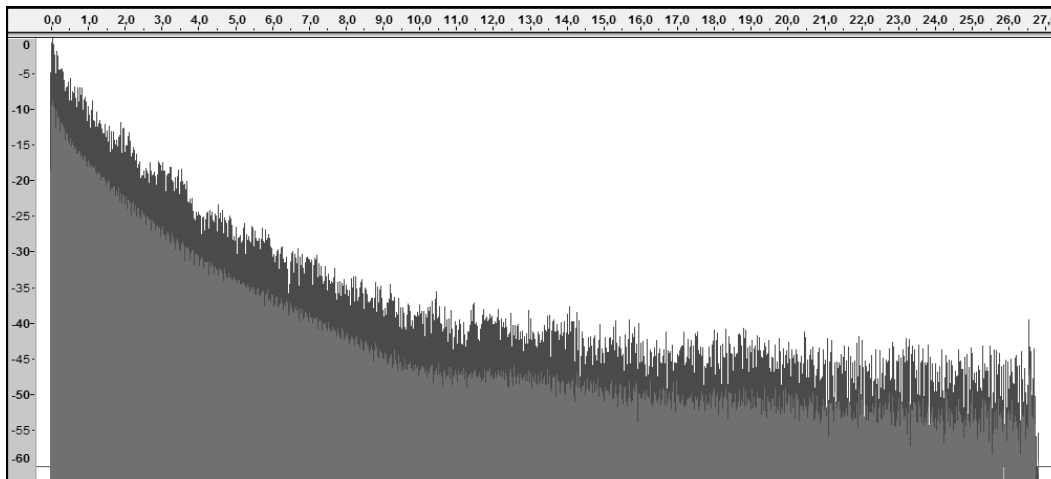
**Figura 3.74.** Notas musicales seleccionadas para estudiar la doble caída de sus envolventes.

### 4.6.3. Resultados obtenidos

Seguidamente se presentan las formas de onda de las alturas musicales citadas anteriormente. Estas representaciones gráficas muestran la evolución del nivel sonoro de cada muestra (eje Y) en función del tiempo (eje X). Se emplean niveles sonoros relativos, asignándoles a los picos máximos de amplitud el valor de 0,0 dB.

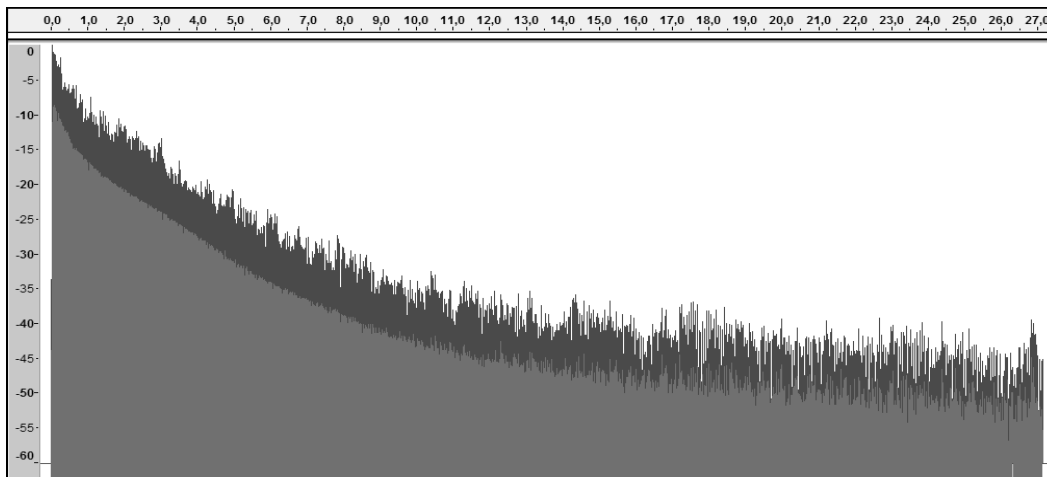
Las envolventes de las notas Sol1, Sol2, Sol3, Sol4, Sol5, Sol6 y Sol7 se examinarán más detenidamente señalando, para cada una de ellas, las pendientes existentes y cuantificando las tasas de caída del sonido inmediato y del sonido de resonancia. Se ha escogido la nota musical Sol por encontrarse en un punto intermedio dentro de cada octava.

- **Nota musical: La0**



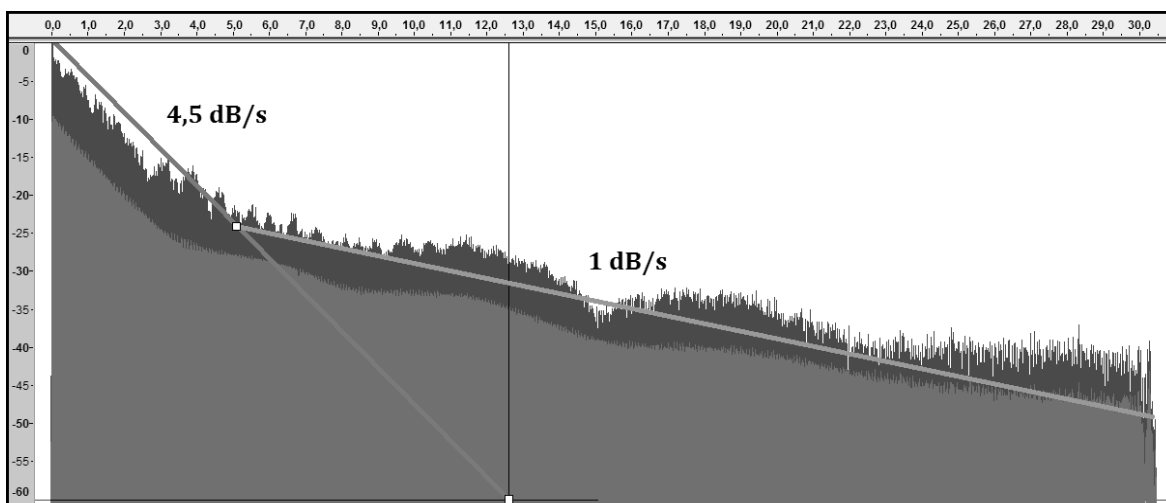
**Figura 3.75.** Envoltura de la forma de onda de la nota La0.

- **Nota musical: Do1**



**Figura 3.76.** Envoltura de la forma de onda de la nota Do1.

- **Nota musical: Sol1**



**Figura 3.77.** Envoltura de la forma de onda de la nota Sol1. Pendiente de caída del sonido inmediato (*trazo rojo*). Pendiente de caída del sonido de resonancia (*trazo verde*).

▪ Nota musical: Do2

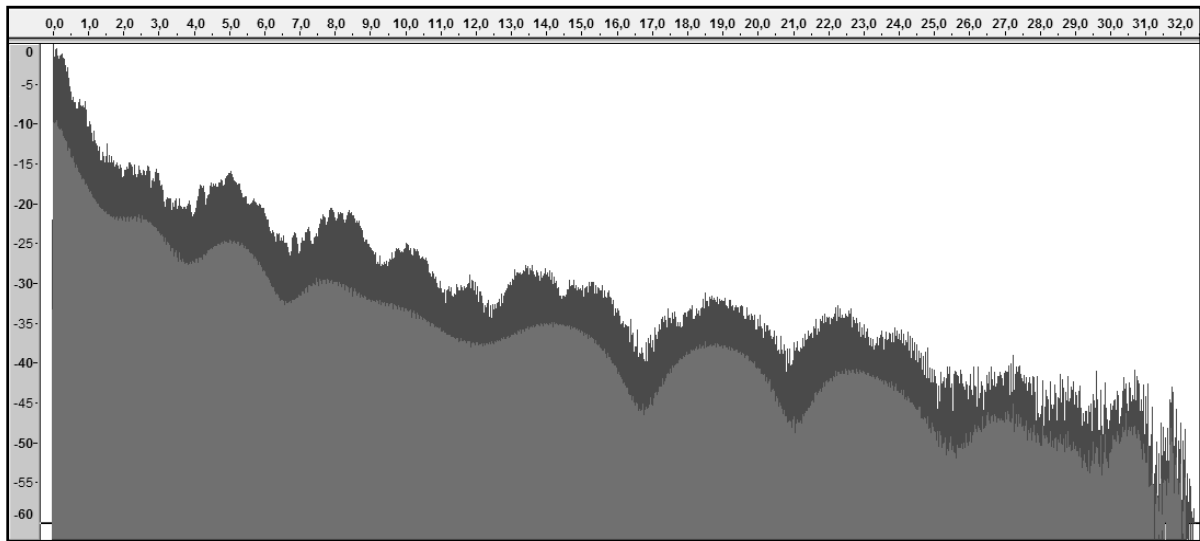


Figura 3.78. Envolvente de la forma de onda de la nota Do2.

▪ Nota musical: Sol2

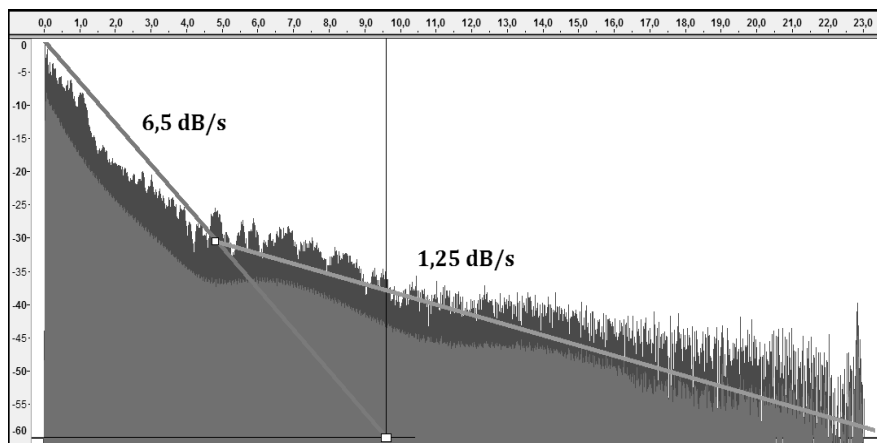


Figura 3.79. Envolvente de la forma de onda de la nota Sol2. Pendiente de caída del sonido inmediato (*trazo rojo*). Pendiente de caída del sonido de resonancia (*trazo verde*).

▪ Nota musical: Do3

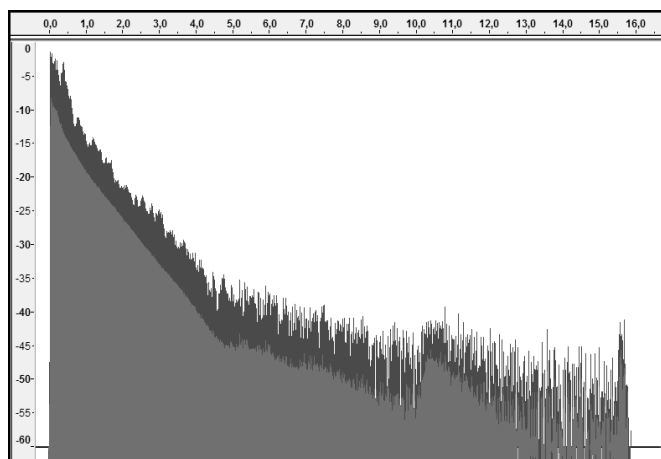
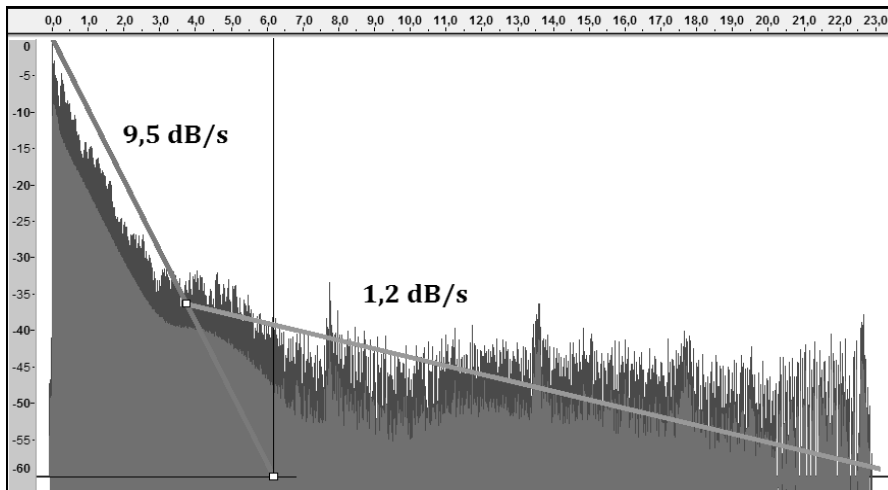


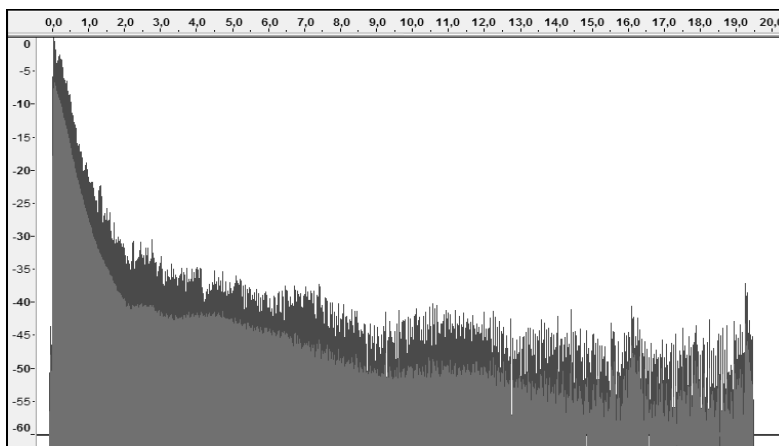
Figura 3.80. Envolvente de la forma de onda de la nota Do3.

▪ **Nota musical: Sol3**



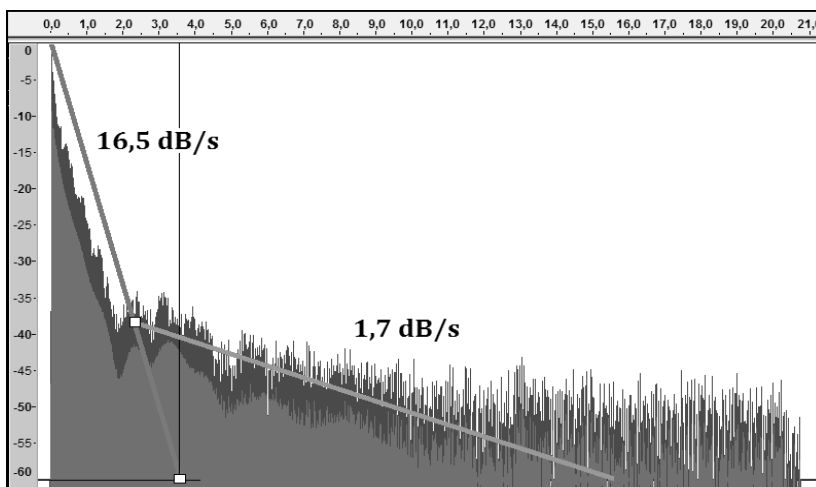
**Figura 3.68.** Envoltura de la forma de onda de la nota Sol3. Pendiente de caída del sonido inmediato (*trazo rojo*). Pendiente de caída del sonido de resonancia (*trazo verde*).

▪ **Nota musical: Do4**



**Figura 3.69.** Envoltura de la forma de onda de la nota Do4.

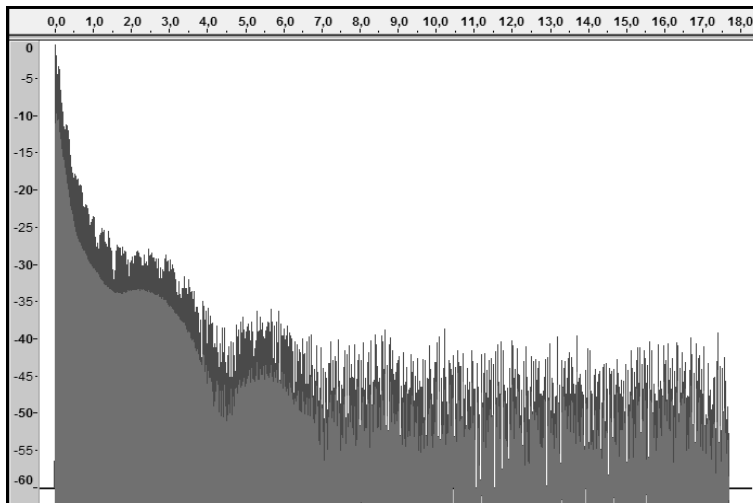
▪ **Nota musical: Sol4**



**Figura 3.70.** Envoltura de la forma de onda de la nota Sol4. Pendiente de caída del sonido inmediato (*trazo rojo*). Pendiente de caída del sonido de resonancia (*trazo verde*).

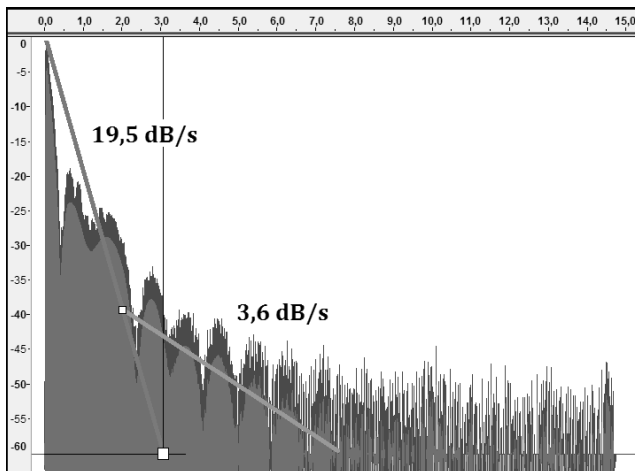


▪ **Nota musical: Do5**



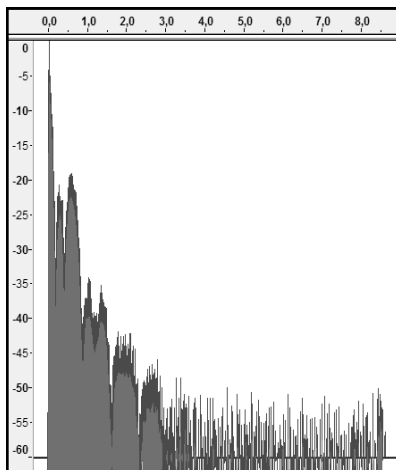
**Figura 3.71.** Envoltura de la forma de onda de la nota Do5.

▪ **Nota musical: Sol5**

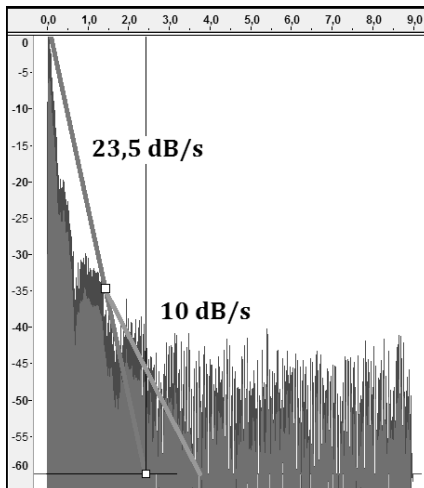


**Figura 3.72.** Envoltura de la forma de onda de la nota Sol5. Pendiente de caída del sonido inmediato (*trazo rojo*). Pendiente de caída del sonido de resonancia (*trazo verde*).

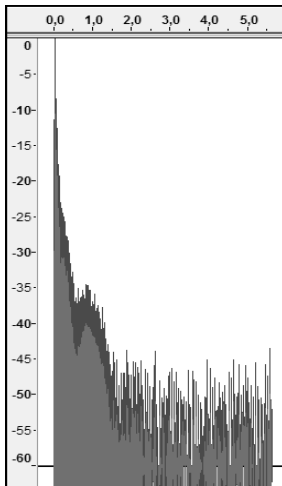
▪ **Nota musical: Do6**



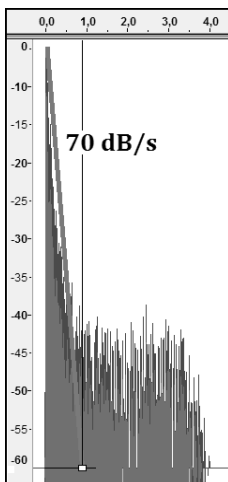
**Figura 3.73.** Envoltura de la forma de onda de la nota Do6.

**▪ Nota musical: Sol6**

**Figura 3.74.** Envoltura de la forma de onda de la nota Sol6. Una única pendiente de caída (trazo rojo).

**▪ Nota musical: Do7**

**Figura 3.75.** Envoltura de la forma de onda de la nota Do7.

**▪ Nota musical: Sol7**

**Figura 3.76.** Envoltura de la forma de onda de la nota Sol7. Una única pendiente de caída (trazo rojo).

▪ **Nota musical: Do8**

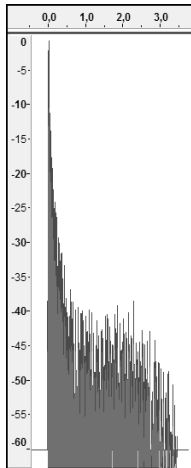


Figura 3.77. Envolvente de la forma de onda de la nota Do8.

**4.6.4. Discusión de los resultados**

En la siguiente **tabla 3.36** se presenta una síntesis de los resultados mostrados en las gráficas anteriores. Estos se contrastan con los extraídos del artículo de Martin (1947).

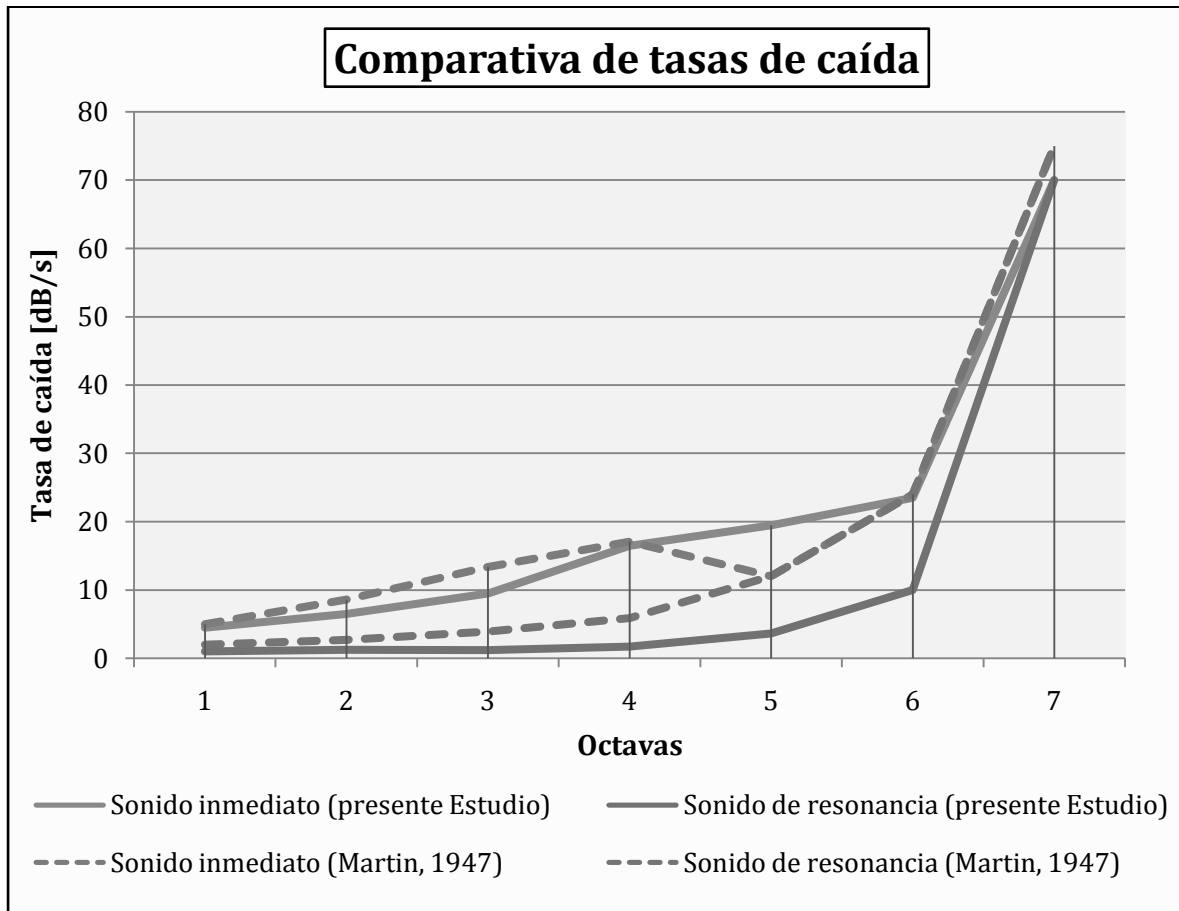
Comparativa de las tasas de caída a lo largo del registro del instrumento							
Octavas musicales	Nº de cuerdas	Sonido inmediato		Sonido de resonancia		Diferencia entre tasas de caída	
		Tasa caída (dB/s)		Tasa caída (dB/s)			
		Presente estudio	Martin (1947)	Presente estudio	Martin (1947)	Presente estudio	Martin (1947)
1	1 ó 2	4,5	5,0	1,0	2,0	3,5	3,0
2	3	6,5	8,6	1,25	2,7	5,25	5,9
3		9,5	13,4	1,2	3,9	8,3	7,5
4		16,5	17,1	1,7	5,9	14,2	11,7
5		19,5	12,0	3,6	12,0	15,9	0,0
6		23,5	24,0	10,0	24,0	13,5	0,0
7		70,0	75,0	70,0	75,0	0,0	0,0

Tabla 3.36. Comparativas de las tasas de caída a lo largo del registro del instrumento.

Los valores de las tasas de caída del sonido inmediato obtenidos en la presente investigación son muy similares a los alcanzados por Martin. La pendiente de caída del sonido inmediato se hace más pronunciada conforme se asciende por la tesitura del instrumento.

En cambio, en los datos referentes a las tasas de caída del sonido de resonancia se observan ciertas discrepancias. A diferencia de los resultados obtenidos por Martin, en las octavas 5 y 6 se observa aún el efecto de la doble caída de las envolventes. La explicación a esta

divergencia de valores puede residir en que Martin empleó para sus mediciones un piano de media cola en vez de uno de gran cola.



**Figura 3.78.** Gráfica comparativa de las tasas de caída del sonido inmediato y de resonancia de las notas del piano a lo largo del registro del instrumento [datos de Martin (1947) y del presente Estudio]

El efecto de la doble caída es más evidente en el registro medio del instrumento, tal y como se refleja en la **figura 3.78**.

## 4.7. Influencia de la dinámica

### 4.7.1. Introducción

Un aspecto importante del comportamiento acústico del piano es la influencia que ejerce la dinámica de una ejecución musical sobre las componentes frecuenciales de los sonidos que emite el instrumento.

Se entiende como dinámica a las gradaciones de la intensidad de la música, esto es, si el sonido es más fuerte o más débil. En notación musical para diferenciar el grado de intensidad sonora se utilizan, entre otros, los siguientes términos (denominados matices), que se presentan a continuación ordenados de menor a mayor intensidad [26]:

- *pp* (*pianissimo*): muy suave.
- *p* (*piano*): suave.
- *mp* (*mezzopiano*): medio suave.
- *mf* (*mezzoforte*): medio fuerte.
- *f* (*forte*): fuerte.
- *ff* (*fortissimo*): muy fuerte.

Para indicar graduaciones más extremas de intensidad del sonido, se agregan más “p” o más “f”. Por ejemplo, la notación *ppp* significa “más suave que *pianissimo*” mientras que *fff* implicará un sonido “más fuerte que el *fortissimo*”.

Las indicaciones de dinámica son relativas, no absolutas. Por ejemplo, *mf* (*mezzoforte*) no indica un nivel exacto de intensidad de la música, sino que un cierto pasaje debe ser un poco más fuerte que *mp* y un poco más suave que *f*. Por ello, en este estudio se trabajará con niveles sonoros relativos [dBr].

En el apartado 4.2.1.1 del **Anexo I.D** se describe la interacción del martillo con la cuerda, desarrollando aspectos que condicionan y moldean el timbre del instrumento.

En términos mecánicos, la dinámica de la interpretación pianística se corresponde con la fuerza de pulsación de las teclas y, por tanto, con la velocidad que adquiere el martillo en su viaje desde su posición de reposo hasta el golpeo de las cuerdas. Mientras mayor es la velocidad, la compresión del fieltro del martillo es más firme y el tiempo de contacto entre este y las cuerdas menor. Teniendo en cuenta que la amortiguación que sufre la vibración de las cuerdas disminuye cuanto más breve sea el tiempo de contacto, resulta que los sonidos tocados

en *ff* dispondrán de un mayor número de parciales superiores en comparación con los interpretados en *pp* [2].

#### 4.7.2. Descripción del método analítico

Para llevar a cabo el estudio se percute una misma nota musical con diferentes intensidades. Con el propósito de facilitar el análisis se han reducido las seis gradaciones dinámicas expuestas en el anterior epígrafe a las cuatro siguientes:

1. *pp*.
2. *p-mp*: una sonoridad intermedia entre *p* y *mp*.<sup>1</sup>
3. *mf-f*: una sonoridad intermedia entre *mf* y *f*.
4. *ff*.

Con el objetivo de constatar si el cambio de dinámica afecta de forma diferente a las componentes frecuenciales de una altura musical dependiendo si esta se encuentra en la zona grave, media o aguda del instrumento, se toman como muestras 3 notas musicales situadas en registros diferenciados. Las notas elegidas son: Si1 = 61,7 Hz (registro grave), Do4 = 261,6 Hz (registro medio) y La6 = 1.760,0 Hz (registro agudo).

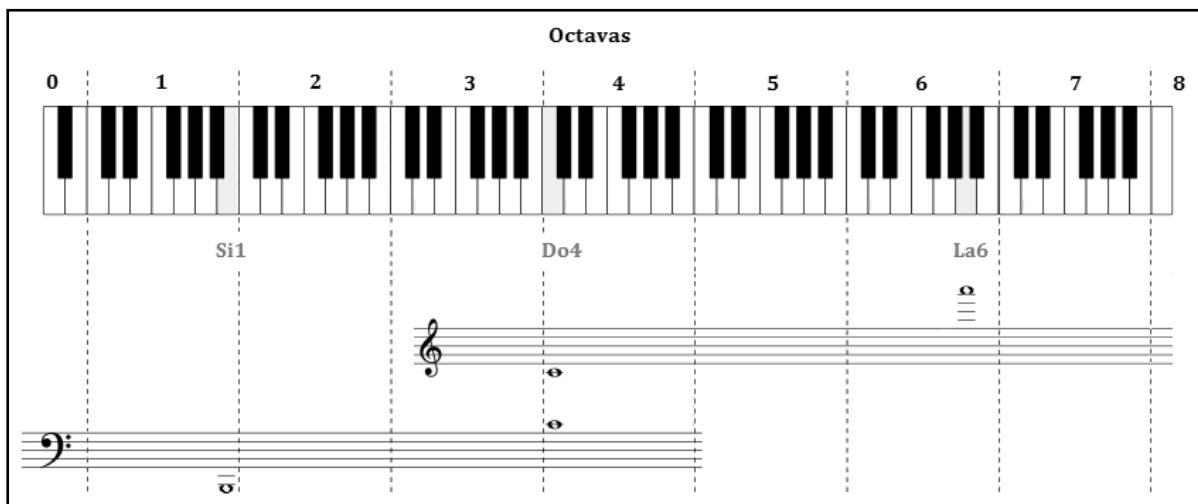


Figura 3.79. Notas musicales escogidas para estudiar el efecto de la dinámica .

Cada una de ellas se interpreta con las cuatro gradaciones de dinámica anteriormente indicadas, sumando un total de 12 registros sonoros (tabla 3.37). Dichos registros comparten varias características: tienen una duración de 1 a 2 s, se tocan sin hacer uso de ningún pedal y

<sup>1</sup> El término *p-mp* no existe en la literatura musical. En este Proyecto se adopta dicha notación como abreviatura de la sonoridad intermedia entre los dos matices que engloba: el *p* y el *mp*. De igual manera sucede con el término *mf-f*.

son notas “sueltas”, es decir, el intérprete al tocarlas levanta el dedo de la tecla casi inmediatamente después de la tecla haya sido pulsada.

<b>Muestras sonoras empleadas para el estudio de la dinámica</b>		
<b>Notas musicales</b>	<b>Dinámica</b>	<b>Pistas CD audio</b>
<b>Si1 = 61,7 Hz</b> [Graves]	<i>ff</i>	017
	<i>mf-f</i>	018
	<i>p-mp</i>	019
	<i>pp</i>	020
<b>Do 4 = 261,6 Hz</b> [Medios]	<i>ff</i>	021
	<i>mf-f</i>	022
	<i>p-mp</i>	023
	<i>pp</i>	024
<b>La 6 = 1.760 Hz</b> [Agudos]	<i>ff</i>	025
	<i>mf-f</i>	026
	<i>p-mp</i>	027
	<i>pp</i>	028

**Tabla 3.37.** Relación de los registros sonoros empleados en el análisis de la influencia de la dinámica.

En el próximo apartado se examina la información extraída de las formas de onda de cada registro sonoro así como la dilucidada mediante el análisis espectral de los mismos. Se incide especialmente en el análisis de las componentes frecuenciales de cada nota, observando los niveles de intensidad de su fundamental y de sus armónicos.

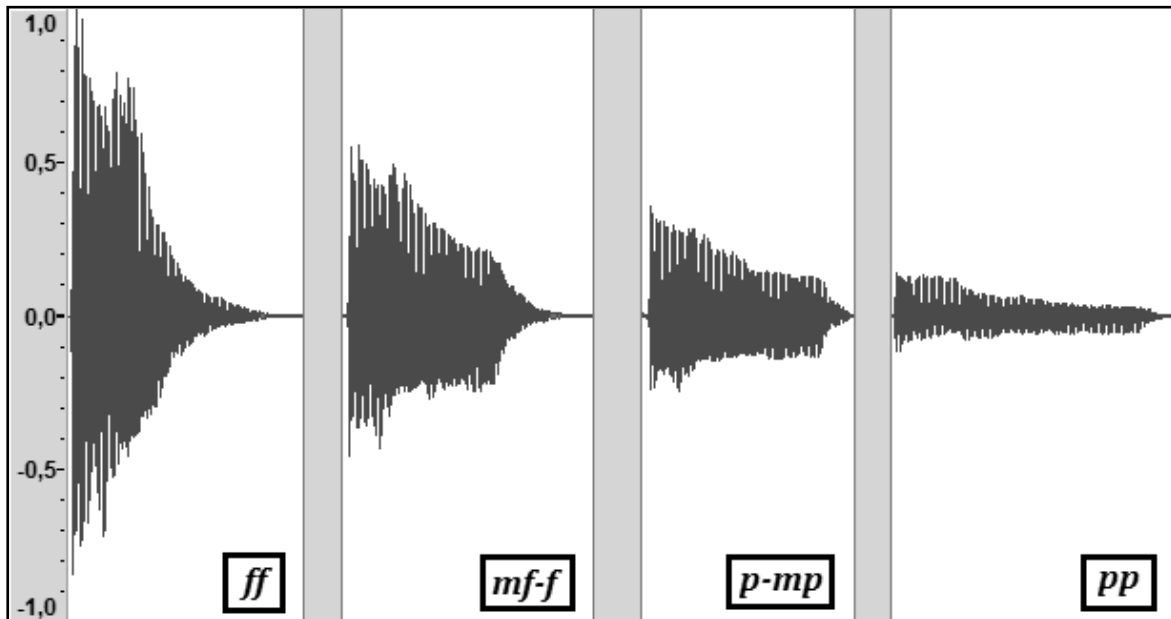
Sabiendo que las gradaciones de dinámica son relativas, a la hora de analizar las muestras sonoras se tiene en cuenta las diferencias de intensidad (expresadas en dBV) que haya entre las cuatro tomas de la misma nota. Es decir, no importa tanto qué nivel de intensidad tiene la nota individualmente tocada en *pp*, como que la interpretada en *p-mp* tenga un nivel sonoro superior y así sucesivamente.

### 4.7.3. Resultados obtenidos

#### 4.7.3.1. Registro grave

##### 4.7.3.1.1. Forma de onda

En la siguiente figura se muestran las formas de ondas correspondientes a los registros sonoros de la **nota Si1 (61,7 Hz)** con las dinámicas *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

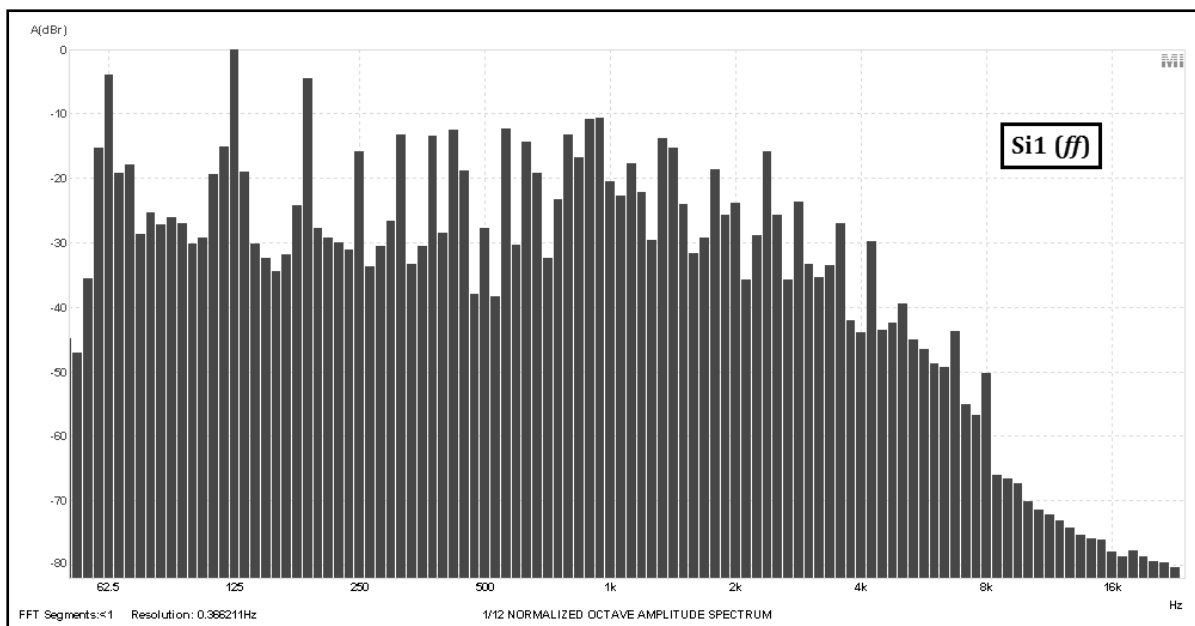


**Figura 3.80.** Comparativa de las formas de onda de la nota Si1 tocada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

Se observa como a medida que se disminuye la dinámica de interpretación de la nota en cuestión, los niveles sonoros alcanzados también decrecen.

#### 4.7.3.1.2. Análisis espectral

A continuación, en las **figuras 3.81, 3.82, 3.83 y 3.84**, se exponen las contribuciones energéticas de cada registro sonoro representadas en bandas de 1/12 de octavas. La amplitud de cada una de las siguientes gráficas está representada en dBr.



**Figura 3.81.** Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do1 tocada en una dinámica *ff*.



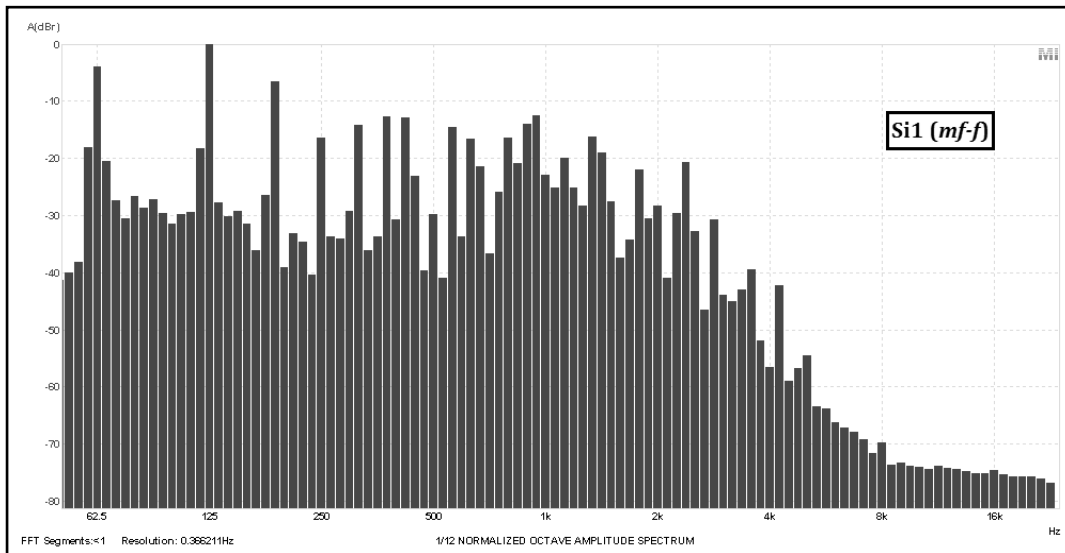


Figura 3.82. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do1 tocada en una dinámica *mf-f*.

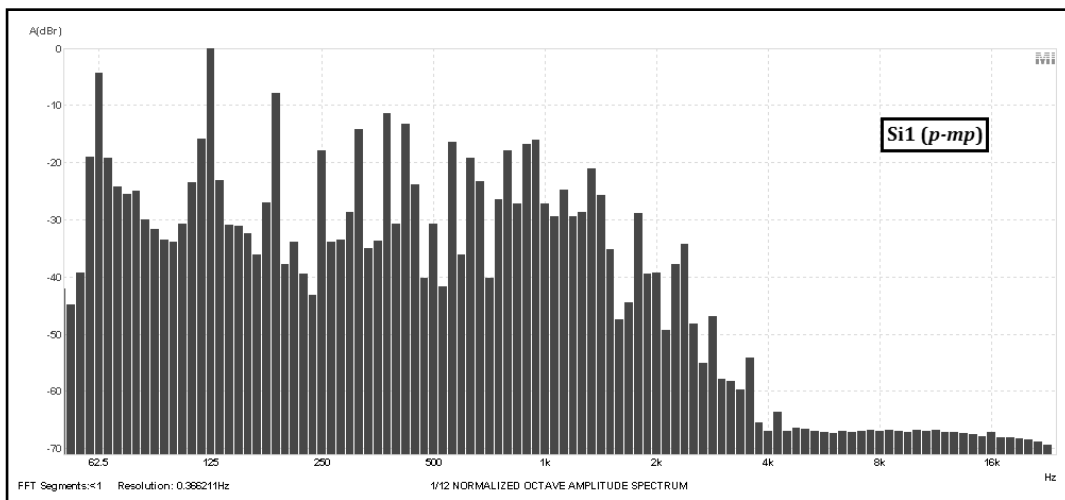


Figura 3.83. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do1 tocada en una dinámica *p-mp*.

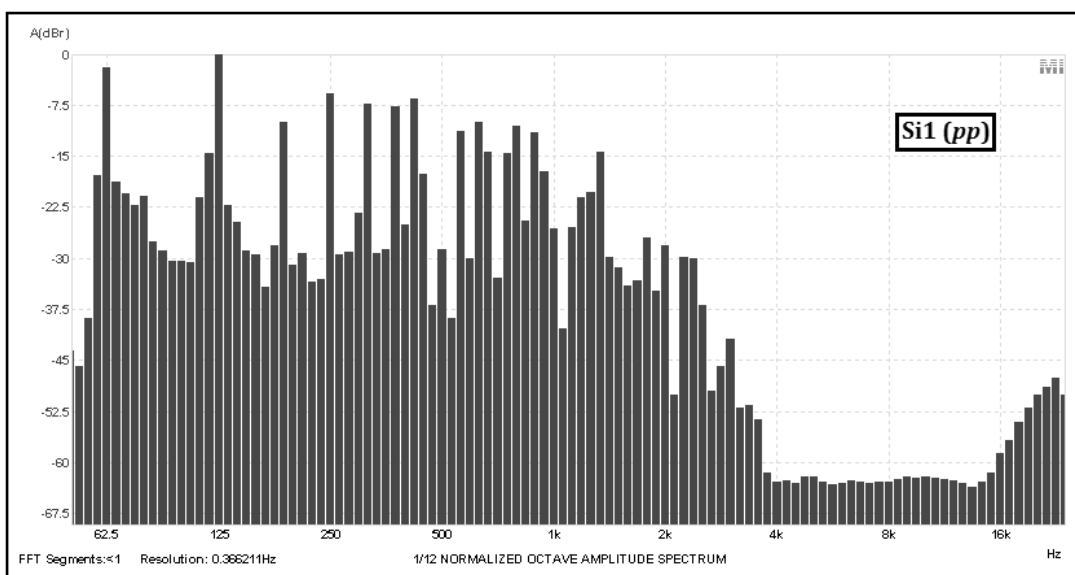


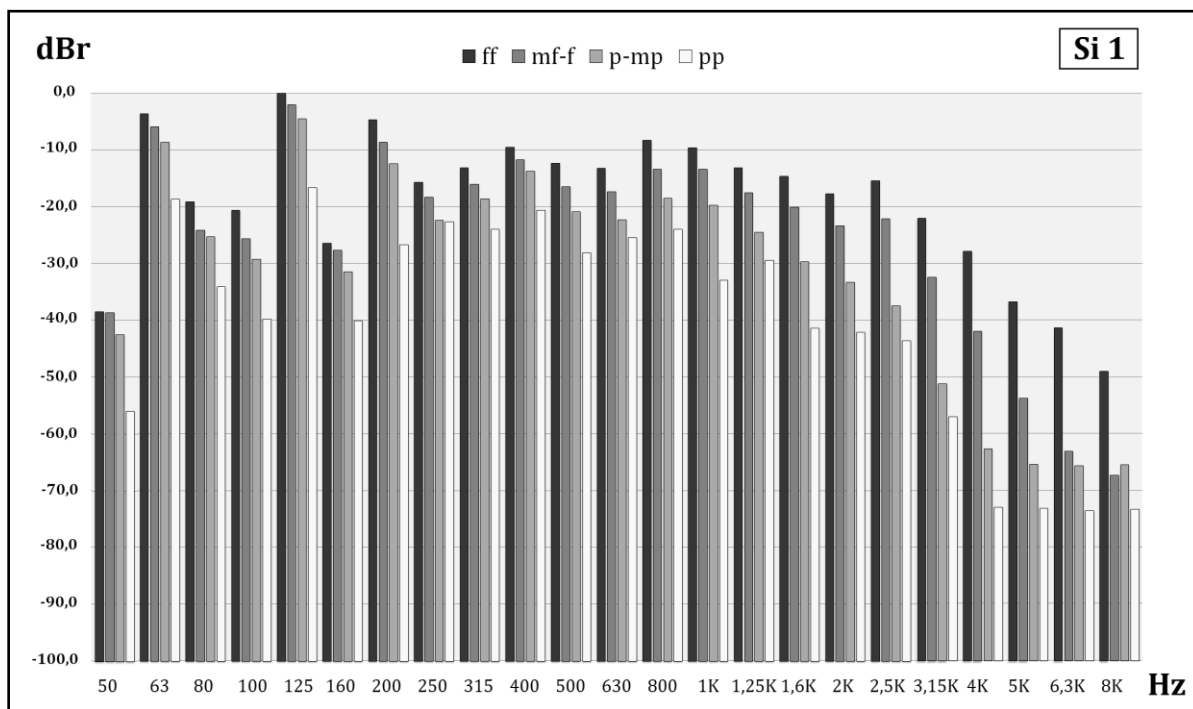
Figura 3.84. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do1 tocada en una dinámica *pp*.

### ▪ Comparativa entre dinámicas

En la siguiente **tabla 3.38** y **figura 3.85** se presenta una comparativa de la distribución energética de la nota Si1 dependiendo de la dinámica con la que esta sea tocada. En este caso, el espectro se acota entre las bandas de 1/3 de octava de 50 Hz y la de 8 KHz, ambas inclusive. El máximo nivel sonoro obtenido de los 4 registros en estudio corresponde a la banda de 125 Hz en condiciones de *ff*. Este constituye el punto de referencia de 0,0 dBr.

<b>Comparativa: Nota Si1 en diferentes dinámicas</b>				
<b>Frec. (Hz)</b> (en bandas de 1/3 de octavas)	<b>Niveles sonoros (dBr)</b>			
<b>Si 1 = 61,7 Hz</b>	<b><i>ff</i></b>	<b><i>mf-f</i></b>	<b><i>p-mp</i></b>	<b><i>pp</i></b>
<b>50</b>	-38,5	-38,6	-42,5	-55,9
<b>63</b>	-3,6	-5,9	-8,7	-18,7
<b>80</b>	-19,1	-24,2	-25,3	-34,1
<b>100</b>	-20,6	-25,6	-29,3	-39,8
<b>125</b>	<b>0,0</b>	<b>-2,0</b>	<b>-4,5</b>	<b>-16,6</b>
<b>160</b>	-26,4	-27,7	-31,4	-40,1
<b>200</b>	-4,6	-8,6	-12,4	-26,7
<b>250</b>	-15,7	-18,3	-22,3	-22,6
<b>315</b>	-13,1	-16,0	-18,6	-23,9
<b>400</b>	-9,5	-11,7	-13,7	-20,6
<b>500</b>	-12,3	-16,5	-20,8	-28,1
<b>630</b>	-13,2	-17,3	-22,3	-25,5
<b>800</b>	-8,3	-13,4	-18,5	-23,9
<b>1000</b>	-9,6	-13,4	-19,7	-32,9
<b>1250</b>	-13,1	-17,6	-24,4	-29,4
<b>1600</b>	-14,6	-20,1	-29,7	-41,4
<b>2000</b>	-17,7	-23,3	-33,3	-42,1
<b>2500</b>	-15,4	-22,1	-37,4	-43,6
<b>3150</b>	-22,0	-32,4	-51,2	-57,1
<b>4000</b>	-27,9	-42,0	-62,6	-73,0
<b>5000</b>	-36,7	-53,8	-65,3	-73,1
<b>6300</b>	-41,4	-63,1	-65,6	-73,6
<b>8000</b>	-49,0	-67,3	-65,5	-73,3

**Tabla 3.38.** Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de la nota Si1 tocada en dinámicas *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.



**Figura 3.85.** Comparativa de las contribuciones energéticas en 1/3 de octava correspondientes a la nota Si1 tocada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

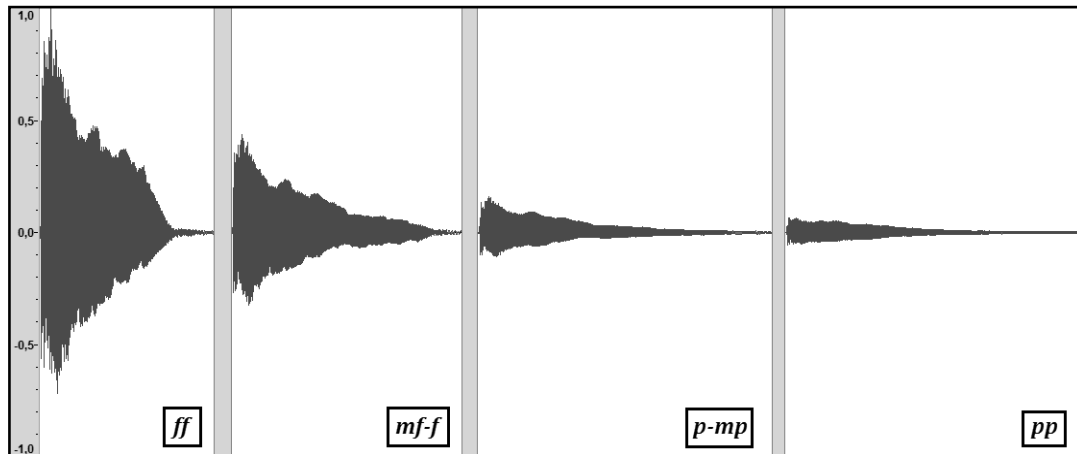
El análisis de los datos expuestos conlleva a dos conclusiones fundamentales:

- La máxima contribución energética, independientemente de la dinámica con la que se interprete la nota musical Si1, se localiza en la banda de 125 Hz, la cual contiene el segundo armónico de esta altura ( $n=2$ ,  $Si_2=123,5$  Hz).
- El nivel sonoro de los armónicos superiores de Si1 cae de forma más pronunciada mientras más suave sea la dinámica de interpretación de dicha nota. Por ejemplo, en la banda de 125 Hz, la diferencia entre las amplitudes obtenidas en *ff* y en *pp* es de 16,6 dB. Sin embargo, si se consultan las bandas de frecuencias superiores se observa como esta diferencia se incrementa, alcanzando su máxima divergencia (45,1 dB) en la banda de 4KHz.

### 4.7.3.2. Registro medio

#### 4.7.3.2.1. Forma de onda

A continuación se presentan las formas de ondas de la **nota Do4 (261,6 Hz)** interpretada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

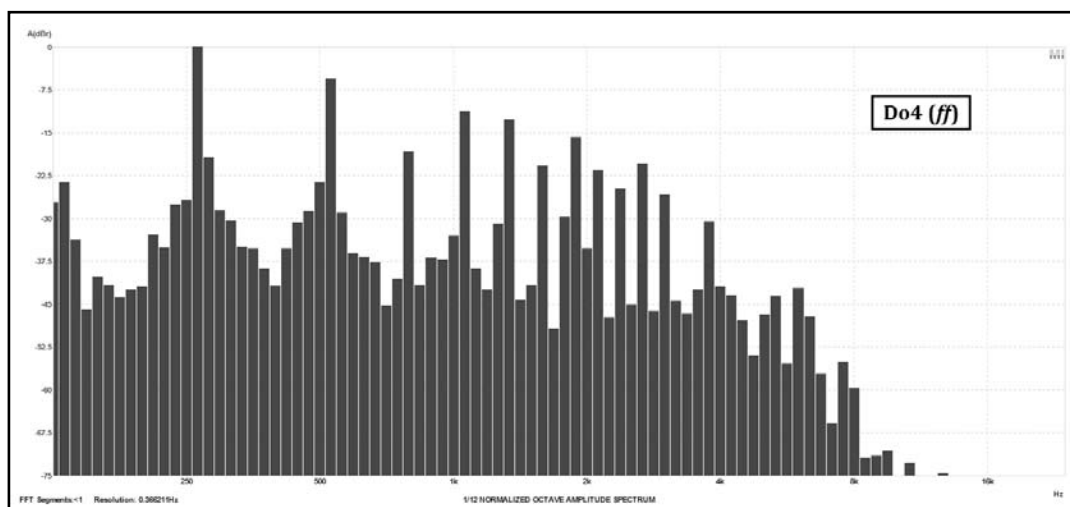


**Figura 3.86.** Comparativa de las formas de onda de la nota Do4 tocada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

Al igual que sucedía en el registro grave del piano, se observa que cuanto menor es la dinámica de la nota en cuestión, la amplitud de su forma de onda y la energía generada por el evento sonoro también es menor.

#### 4.7.3.2.2. Análisis espectral

En las siguientes **figuras 3.87, 3.88, 3.89 y 3.90** se exponen las contribuciones energéticas de cada registro sonoro representadas en bandas de 1/12 de octavas. La amplitud de cada una de las siguientes gráficas está representada en dBr.



**Figura 3.87.** Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do4 tocada en una dinámica *ff*.

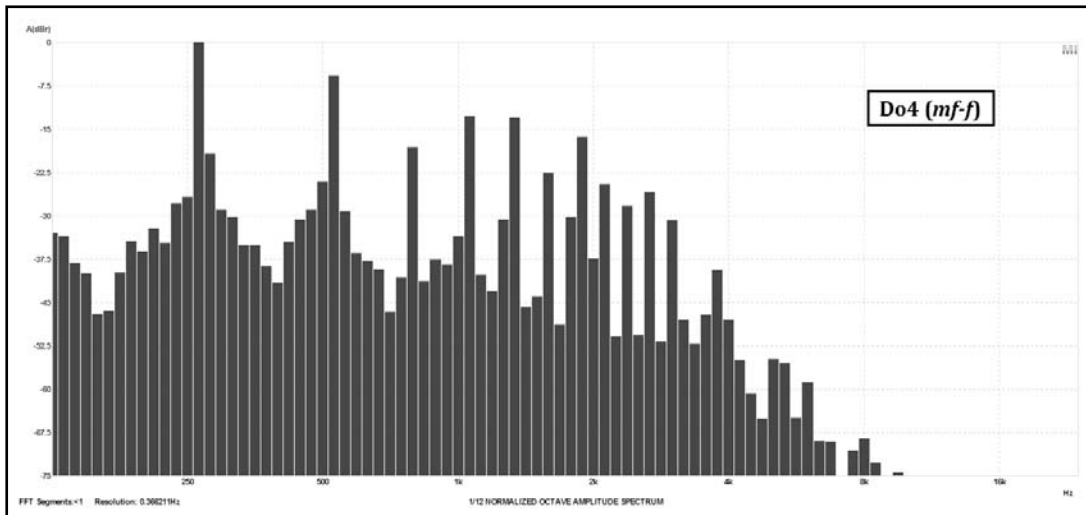


Figura 3.88. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do4 tocada en una dinámica *mf-f*.

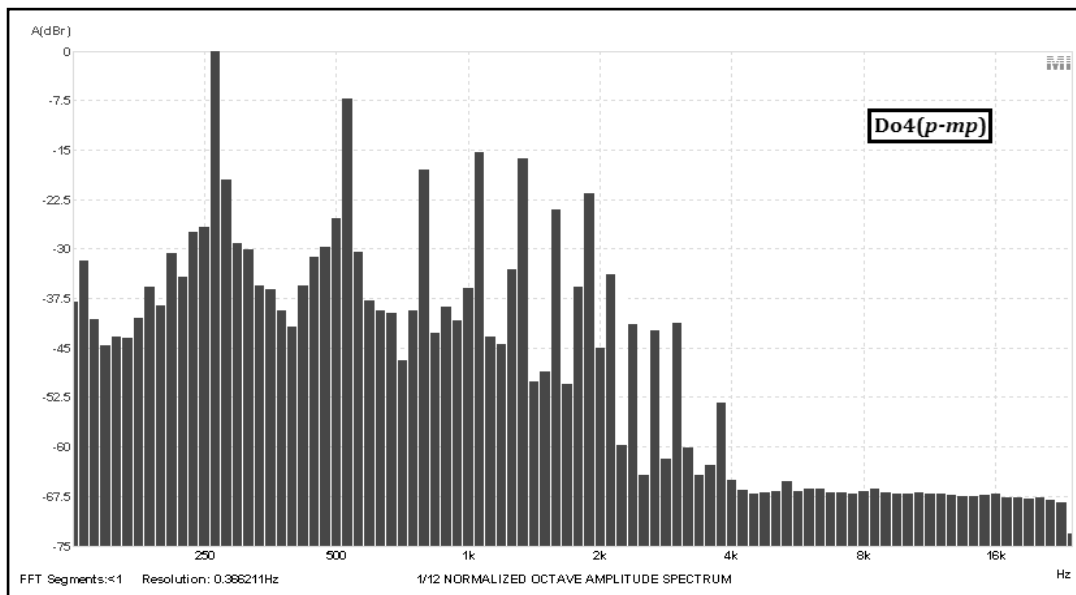


Figura 3.89. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do4 tocada en una dinámica *p-mp*.

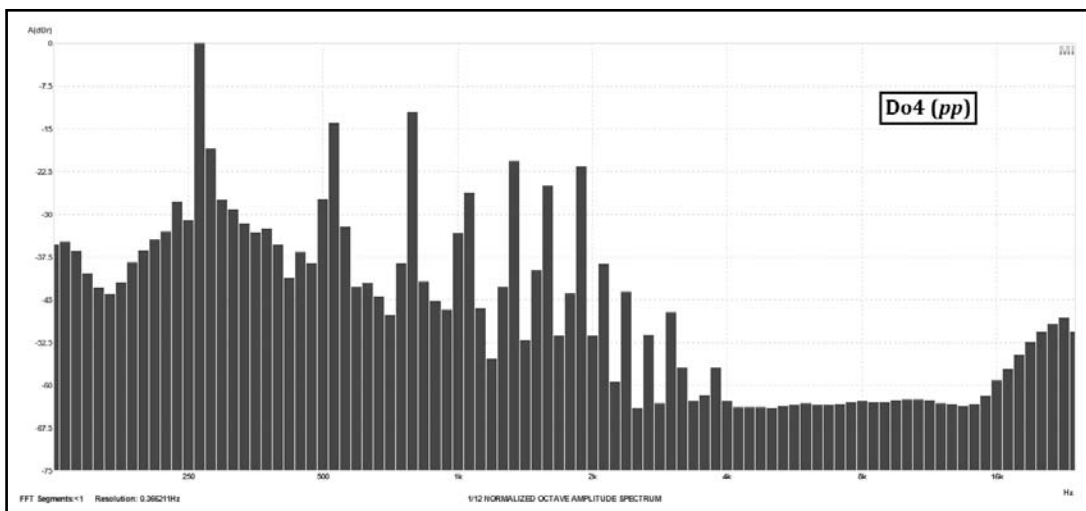


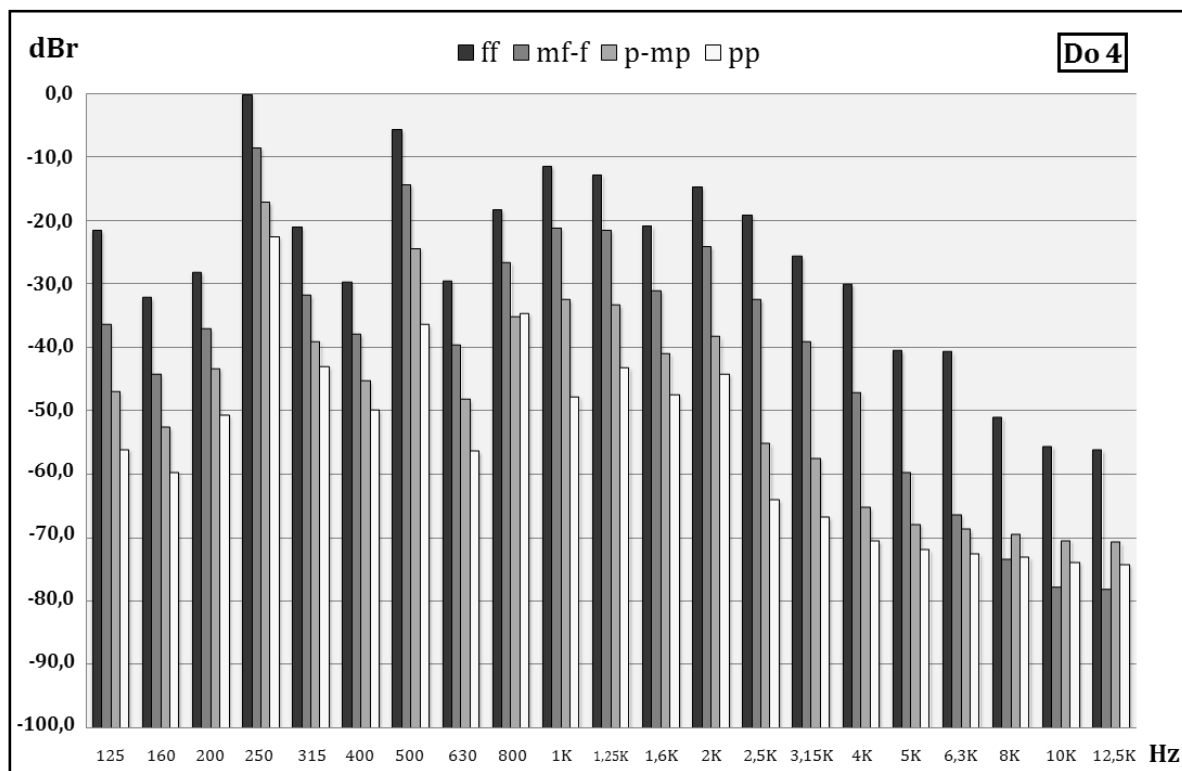
Figura 3.90. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota Do4 tocada en una dinámica *pp*.

### ▪ Comparativa entre dinámicas

En la **tabla 3.39** y la **figura 3.91** se muestra una comparativa de la distribución energética de la nota Do4 según la dinámica con la que esta sea interpretada. En esta ocasión, el espectro se acota entre las bandas de 1/3 de octava de 125 Hz y la de 12,5 KHz, ambas inclusive. El máximo nivel sonoro obtenido de los 4 registros en estudio corresponde a la banda de 250 Hz en condiciones de *ff*. Este constituye el punto de referencia de 0,0 dBr.

<b>Comparativa: Nota Do4 en diferentes dinámicas</b>				
<b>Frec. (Hz)</b> (en bandas de 1/3 de octava)	<b>Niveles sonoros (dBr)</b>			
<b>Do4=261,6 Hz</b>	<b><i>ff</i></b>	<b><i>mf-f</i></b>	<b><i>p-mp</i></b>	<b><i>pp</i></b>
<b>125</b>	-21,5	-36,3	-47,0	-56,1
<b>160</b>	-32,1	-44,2	-52,6	-59,7
<b>200</b>	-28,1	-37,0	-43,3	-50,7
<b>250</b>	<b>0,0</b>	<b>-8,4</b>	<b>-17,1</b>	<b>-22,5</b>
<b>315</b>	-21,0	-31,7	-39,1	-43,0
<b>400</b>	-29,6	-37,9	-45,3	-49,8
<b>500</b>	-5,6	-14,3	-24,3	-36,4
<b>630</b>	-29,5	-39,6	-48,2	-56,4
<b>800</b>	-18,2	-26,6	-35,1	-34,7
<b>1000</b>	-11,3	-21,1	-32,4	-47,8
<b>1250</b>	-12,7	-21,5	-33,3	-43,2
<b>1600</b>	-20,8	-31,0	-41,0	-47,4
<b>2000</b>	-14,6	-24,0	-38,3	-44,2
<b>2500</b>	-19,1	-32,4	-55,2	-64,1
<b>3150</b>	-25,6	-39,0	-57,5	-66,8
<b>4000</b>	-30,0	-47,2	-65,3	-70,6
<b>5000</b>	-40,5	-59,7	-67,9	-72,0
<b>6300</b>	-40,7	-66,4	-68,7	-72,6
<b>8000</b>	-51,1	-73,5	-69,6	-73,2
<b>10000</b>	-55,6	-77,9	-70,5	-73,9
<b>12500</b>	-56,2	-78,3	-70,8	-74,3

**Tabla 3.39.** Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de la nota Do4 tocada en dinámicas *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.



**Figura 3.91.** Comparativa de las contribuciones energéticas en 1/3 de octava correspondientes a la nota Do4 tocada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

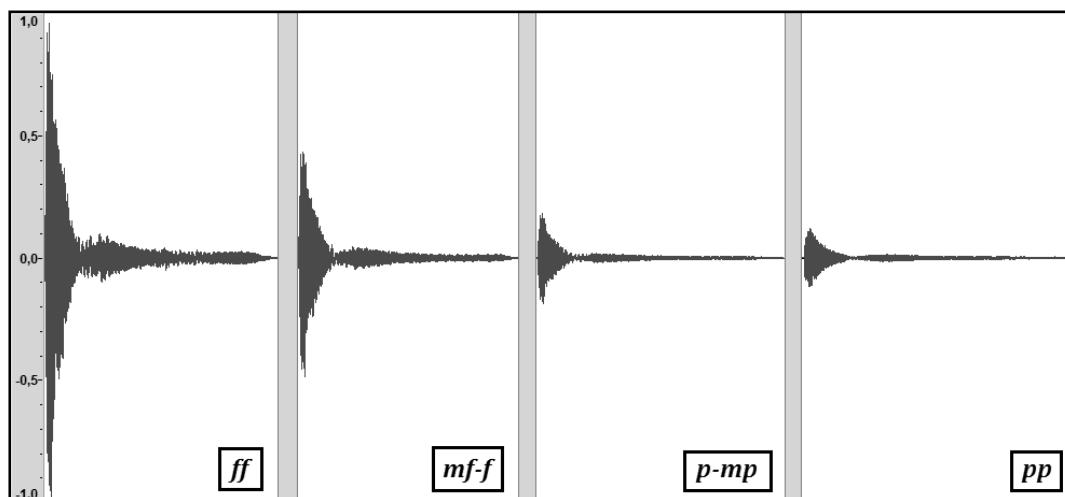
El análisis de los datos presentados conduce a las siguientes conclusiones:

- La máxima contribución energética, independientemente de la dinámica con la que se interprete la nota musical Do4, se focaliza en la banda de 250 Hz, la cual contiene el armónico fundamental de esta altura (n=1, Do4=261,6 Hz).
- El nivel sonoro de los armónicos superiores de Do4 cae de forma más pronunciada mientras más suave sea la dinámica de interpretación de dicha nota. Por ejemplo, en la banda de 250 Hz, la diferencia entre las amplitudes obtenidas en *ff* y en *pp* es de 22,5 dB. Sin embargo, si se consultan las bandas de frecuencias superiores se observa como esta diferencia se incrementa, alcanzando su máxima divergencia (45,0 dB) en la banda de 2,5 KHz.

### 4.7.3.3. Registro agudo

#### 4.7.3.3.1. Forma de onda

En la siguiente figura se muestran las formas de ondas correspondientes a los registros sonoros de la nota La6 (1.760 Hz) con las dinámicas *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.



**Figura 3.92.** Comparativa de las formas de onda de la nota La6 tocada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

En el registro agudo también se observa la correlación existente entre la disminución de la dinámica de interpretación y el decrecimiento de la amplitud de su forma de onda y de la energía generada por la muestra sonora.

#### 4.7.3.3.2. Análisis espectral

Las componentes frecuenciales que interesa visualizar para este análisis son las correspondientes a la frecuencia fundamental de la nota La6 (1.760 Hz) así como sus armónicos. Por lo tanto, para una mejor visualización de esta zona de interés el espectro se acotará desde la banda de 1/12 de octava de 1.250 Hz hasta la de 20 KHz. La amplitud de cada una de las siguientes gráficas está representada en dBr.



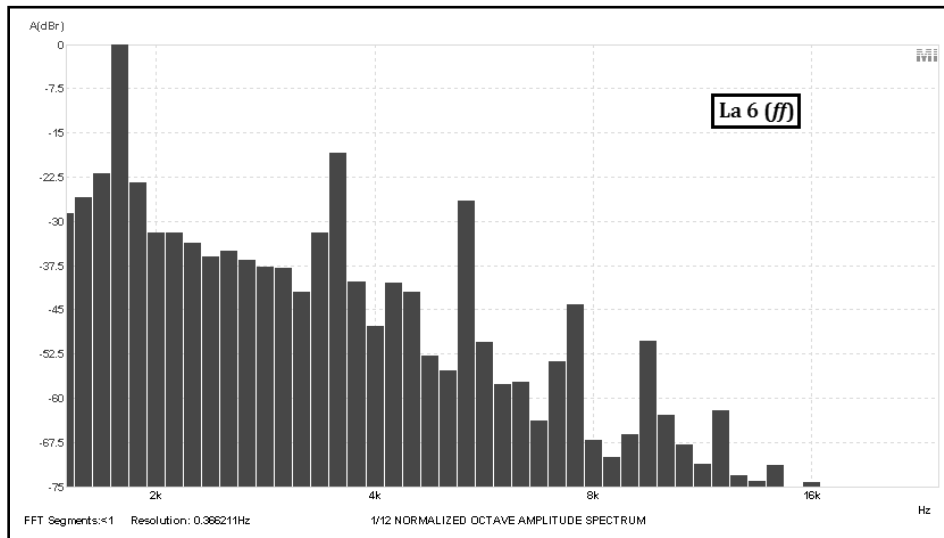


Figura 3.93. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota La6 tocada en una dinámica *ff*.

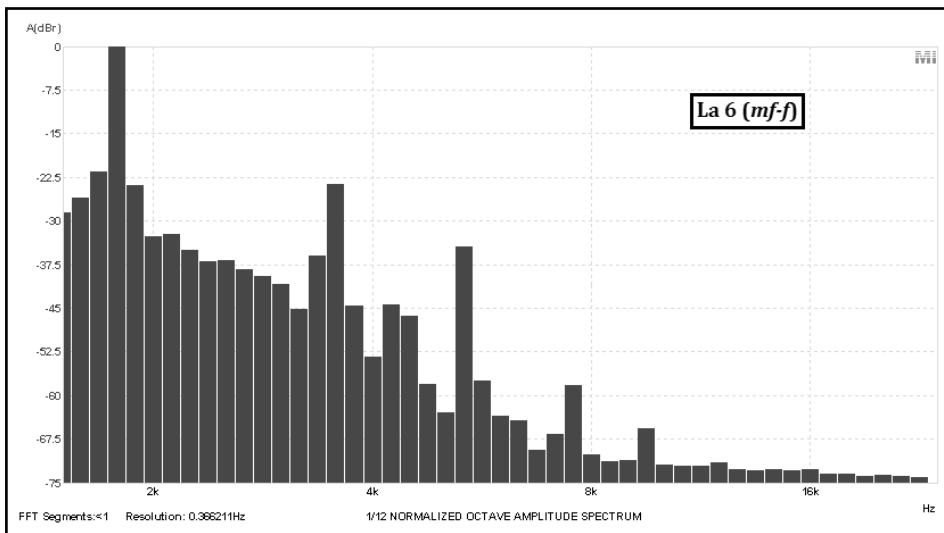


Figura 3.94. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota La6 tocada en una dinámica *mf-f*.

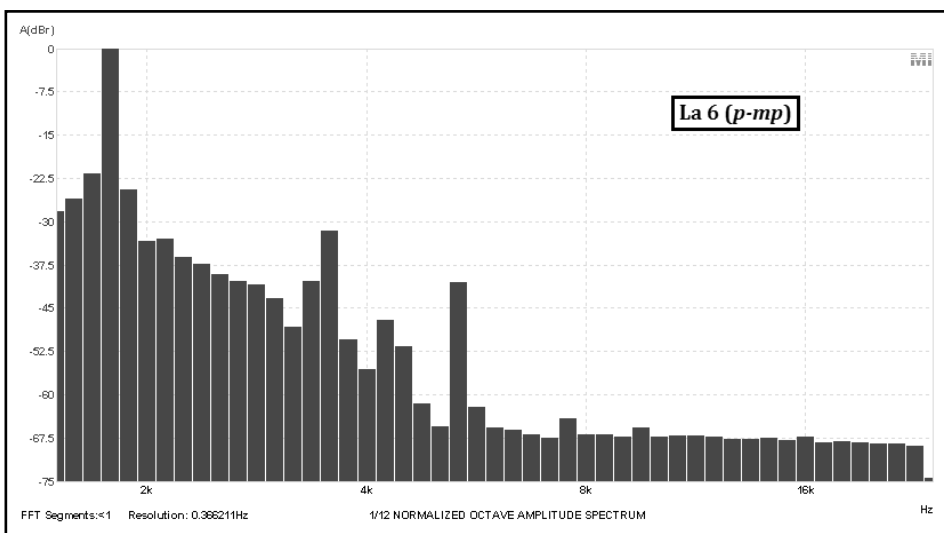


Figura 3.95. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota La6 tocada en una dinámica *p-mp*.

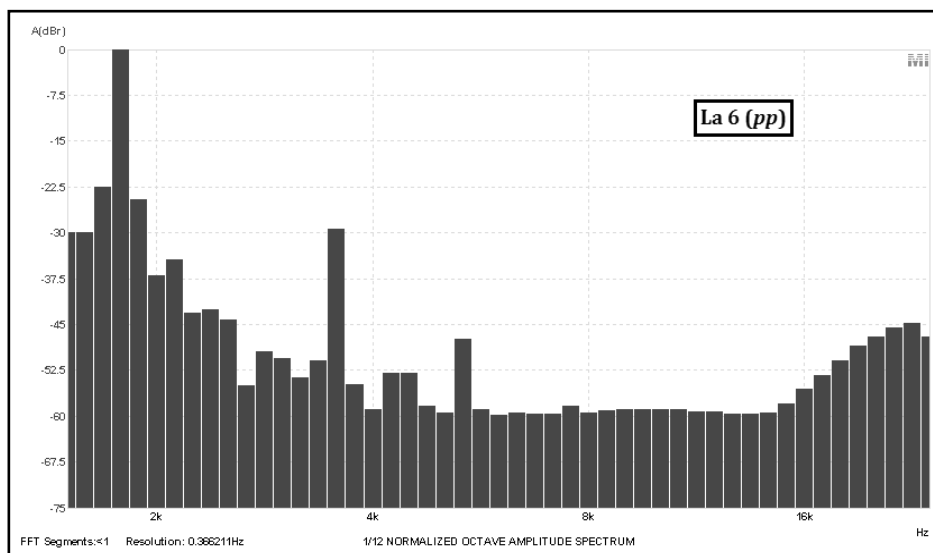


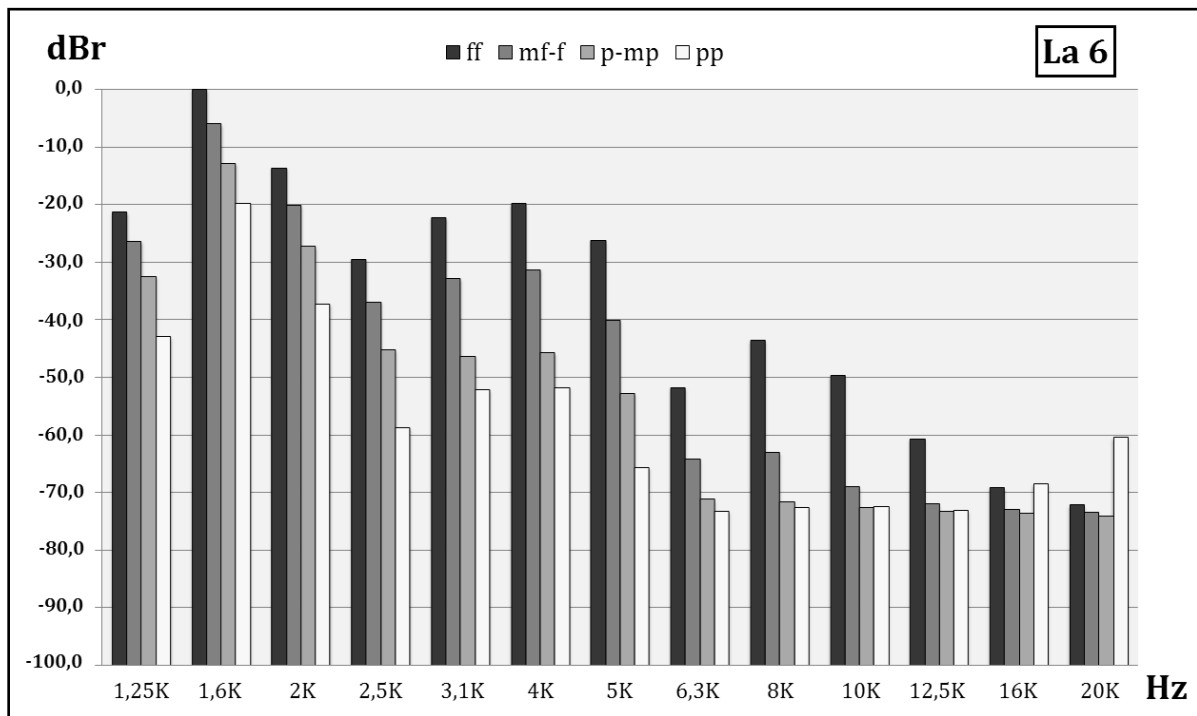
Figura 3.96. Espectro frecuencial en bandas de 1/12 de octava de la nota La6 tocada en una dinámica *pp*.

#### ▪ Comparativa entre dinámicas

En la **tabla 3.40** y la **figura 3.97** se presenta una comparativa de la distribución energética de la nota La6 dependiendo de la dinámica con la que esta sea tocada. El espectro se estudia entre las bandas de 1/3 de octava de 1.250 Hz y la de 20 KHz, ambas inclusive. El máximo nivel sonoro obtenido de los 4 registros en estudio corresponde a la banda de 1600 Hz en condiciones de *ff*. Este constituye el punto de referencia de 0,0 dBr.

Comparativa: Nota La6 en diferentes dinámicas				
Frec. (Hz) (en bandas de 1/3 de octava)	Niveles sonoros (dBr)			
La 6 = 1.760 Hz	<i>ff</i>	<i>mf-f</i>	<i>p-mp</i>	<i>pp</i>
1250	-21,4	-26,5	-32,6	-43,1
1600	<b>0,0</b>	<b>-6,1</b>	<b>-12,9</b>	<b>-19,8</b>
2000	-13,7	-20,2	-27,3	-37,3
2500	-29,6	-37,1	-45,3	-58,8
3150	-22,3	-33,0	-46,5	-52,2
4000	-19,9	-31,4	-45,9	-51,9
5000	-26,4	-40,2	-52,9	-65,7
6300	-51,9	-64,2	-71,3	-73,4
8000	-43,6	-63,2	-71,6	-72,6
10000	-49,8	-69,1	-72,7	-72,6
12500	-60,8	-72,1	-73,4	-73,2
16000	-69,3	-73,0	-73,7	-68,6
20000	-72,3	-73,6	-74,2	-60,5

Tabla 3.40. Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de la nota La6 tocada en dinámicas *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.



**Figura 3.97.** Comparativa de las contribuciones energéticas en 1/3 de octava correspondientes a la nota La6 tocada en *ff*, *mf-f*, *p-mp* y *pp*.

El análisis de los datos expuestos conduce a las siguientes conclusiones:

- La máxima contribución energética, independientemente de la dinámica con la que se interprete la nota musical La6, se focaliza en la banda de 1,6 KHz, la cual contiene el armónico fundamental de esta altura ( $n=1$ ,  $La6=1.760$  Hz).
- El nivel sonoro de los armónicos superiores de La6 cae de forma más pronunciada mientras más suave sea la dinámica de interpretación de dicha nota. Por ejemplo, en la banda de 1,6 KHz, la diferencia entre las amplitudes obtenidas en *ff* y en *pp* es de 19,8 dB. Sin embargo, si se consultan las bandas de frecuencias superiores se observa como esta diferencia se incrementa, alcanzando su máxima divergencia (39,3 dB) en la banda de 5 KHz.

#### 4.7.3.4. Discusión de los resultados

A continuación en la **tabla 3.41** se muestra una comparativa entre los distintos niveles sonoros alcanzados por las notas Si1 (registro grave), Do4 (registro medio) y La6 (registro agudo) dependiendo de la dinámica con la que se interpreten. Se analizan dichos niveles para cada altura sonora en la banda de frecuencia de tercios de octavas que presente una mayor contribución energética y en la que se refleje una mayor diferencia entre las amplitudes alcanzadas en *ff* y *pp*.

Comparativa entre los distintos niveles sonoros obtenidos de las notas Si1, Do4 y La6 a distintas bandas de 1/3 de octava dependiendo de la dinámica de interpretación						
Bandas de 1/3 de octava		Registro	Diferencias de niveles entre:			
			<i>ff</i> y <i>f-mf</i>	<i>f-mf</i> y <i>mp-p</i>	<i>mp-p</i> y <i>pp</i>	<i>ff</i> y <i>pp</i>
Banda de mayor contribución energética	125 Hz	<b>Grave (Si1)</b>	2,0 dB	2,5 dB	12,1 dB	16,6 dB
	250 Hz	<b>Medio (Do4)</b>	8,4 dB	8,7 dB	5,4 dB	22,5 dB
	1,6 KHz	<b>Agudo (La6)</b>	6,1 dB	6,8 dB	6,9 dB	19,8 dB
Banda de mayor divergencia entre los niveles alcanzados en <i>ff</i> y <i>pp</i>	4 KHz	<b>Grave (Si1)</b>	14,1 dB	20,6 dB	10,4 dB	45,1 dB
	2,5 KHz	<b>Medio (Do4)</b>	13,3 dB	22,8 dB	8,9 dB	45,0 dB
	5 KHz	<b>Agudo (La6)</b>	13,8 dB	12,7 dB	12,8 dB	39,3 dB

**Tabla 3.41.** Comparativa entre los diferentes niveles obtenidos de las notas Si1, Do4 y La 6 a distintas bandas de 1/3 de octava dependiendo de la dinámica de interpretación.

A medida que el sonido es más agudo, la caída del nivel de sus armónicos ocurre más rápidamente. Esto sucede en todo el rango de dinámicas pero resulta especialmente patente en los sonidos “más suaves”. En el caso de la nota Si1, la mayor divergencia existente entre los niveles sonoros en *ff* y *pp* (45,1 dB) se alcanza en la banda de 4 KHz, que constituye la 15ª banda a partir de la que contiene a la frecuencia fundamental de dicho sonido, la de 63 Hz. Por su parte, la altura Do4 presenta la máxima diferencia entre los niveles obtenidos en *ff* y *pp* (45,0 dB) en la banda de 2,5 KHz, la número 10 a partir de la de 250 Hz, que es la que encierra a su armónico fundamental. Finalmente, la nota más aguda La6 alcanza la mayor separación entre los valores de amplitud sonora en *ff* y *pp* en la banda de 5 KHz, la quinta comenzando por la de 1,6 KHz que es la que contiene a su frecuencia fundamental.

Independientemente de la frecuencia de la altura fundamental los niveles sonoros de los armónicos de las notas interpretadas en dinámica “suave” caen más rápidamente que los de las alturas tocadas en dinámica “fuerte”. Es decir, la diferencia entre los niveles sonoros en *ff* y *pp* para un mismo armónico no se mantiene constante a lo largo del espectro frecuencial del sonido, aumentando conforme se asciende por la serie armónica.

## 4.8. Efectos de la acción de los pedales

### 4.8.1. Pedal derecho

#### 4.8.1.1. Introducción

Tal y como se desarrolla en el apartado 4.5.2 del **Anexo I.D**, el accionamiento del pedal derecho del piano, también conocido como pedal de resonancia, eleva los apagadores de todas las cuerdas del instrumento permitiendo así la vibración libre de estas mientras este se mantenga pulsado.

A grandes rasgos, las notas interpretadas bajo el efecto del pedal derecho tendrán un tiempo de caída más largo y una mayor contribución energética respecto a las mismas en condiciones normales. La adición de las vibraciones de las demás cuerdas que oscilan por simpatía a través del aire y de los puentes tonales provoca una modificación del timbre resultante [2].

#### 4.8.1.2. Descripción del método analítico

Para llevar a cabo el estudio se elige una muestra de 5 notas musicales a lo largo de la extensión del instrumento (véase **tabla 3.42** y **figura 3.98**). Estas son interpretadas en una dinámica *forte* para así excitar el mayor número posible de parciales superiores, manteniendo pulsada la tecla correspondiente hasta la extinción del sonido generado. Seguidamente estas alturas vuelven a tocarse de igual manera pero esta vez pisando el pedal derecho.

Muestras sonoras empleadas para el estudio de la acción del pedal derecho (de resonancia)			
Notas musicales	Frecuencia	Pedal derecho accionado	Pistas CD audio
Do1	32,7 Hz	Sí	030
		No	002
Do2	65,4 Hz	Sí	032
		No	004
Do3	130,8 Hz	Sí	034
		No	006
Do5	523,3 Hz	Sí	038
		No	010
Do7	2.093,0 Hz	Sí	042
		No	014

**Tabla 3.42.** Relación de los registros sonoros empleados en el análisis de la influencia de la dinámica.

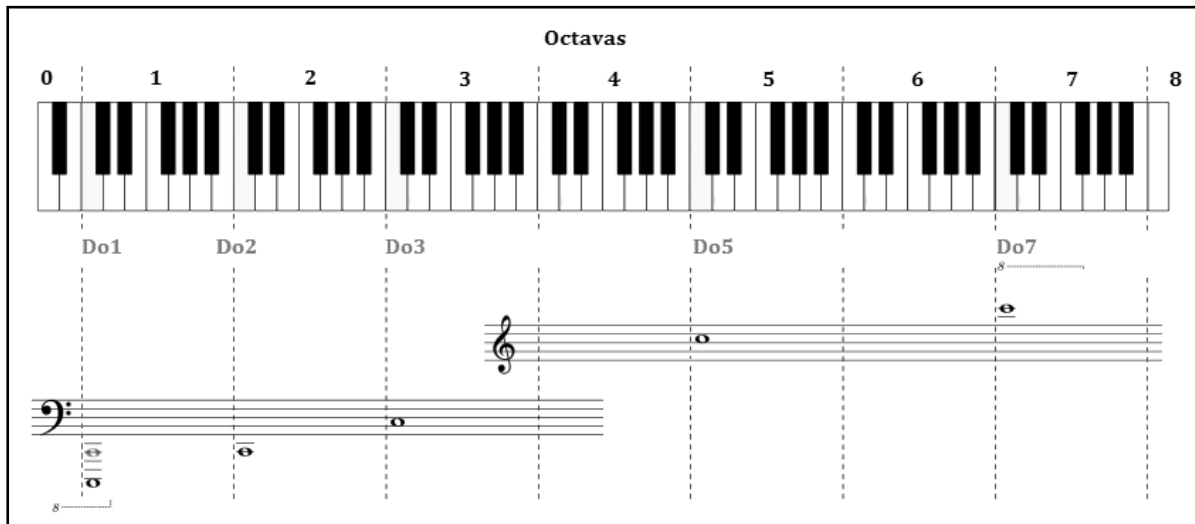


Figura 3.98. Notas musicales escogidas para estudiar el efecto del pedal derecho.

### 4.8.1.3. Resultados obtenidos

#### 4.8.1.3.1. Forma de onda

A continuación se presentan varias gráficas comparativas de las formas de onda obtenidas al interpretar las notas musicales Do1, Do3, Do5 y Do7 sin y con el accionamiento del pedal derecho. En ambos casos la amplitud de las formas de onda se representa en niveles relativos, es decir, estas se encuentran normalizadas.

#### ▪ Nota musical: Do1

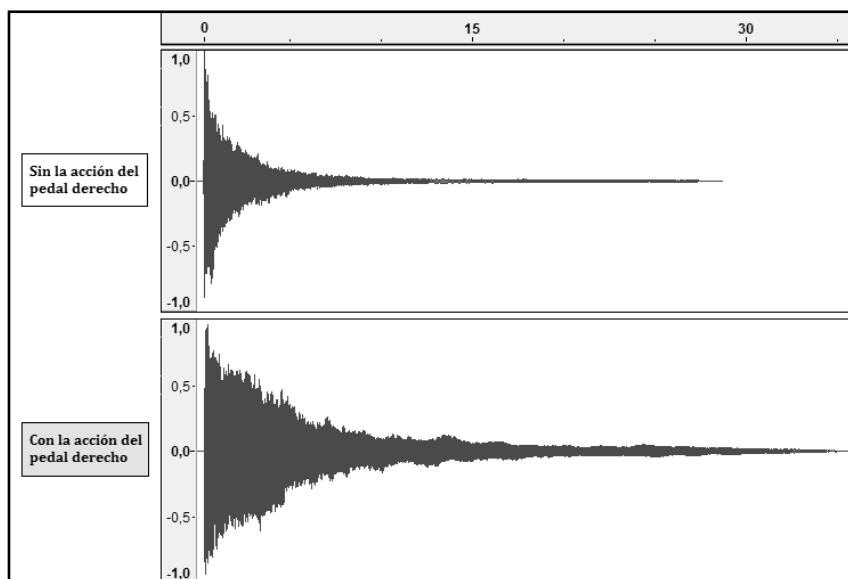


Figura 3.99. Comparativa de la nota Do1 tocada sin y con la acción del pedal derecho.

▪ Nota musical: Do3

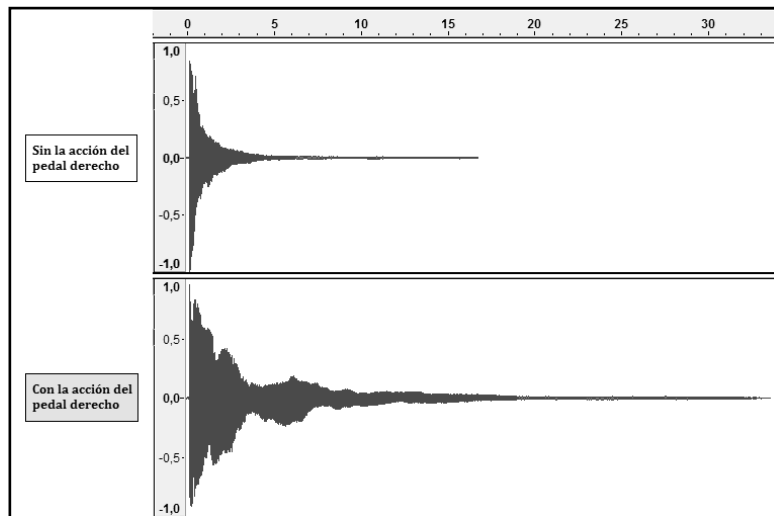


Figura 3.100. Comparativa de la nota Do3 tocada sin y con la acción del pedal derecho.

▪ Nota musical: Do5

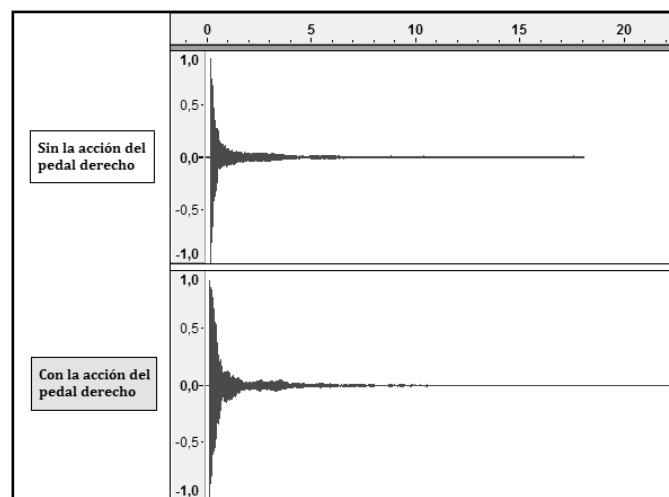


Figura 3.101. Comparativa de la nota Do5 tocada sin y con la acción del pedal derecho.

▪ Nota musical: Do7

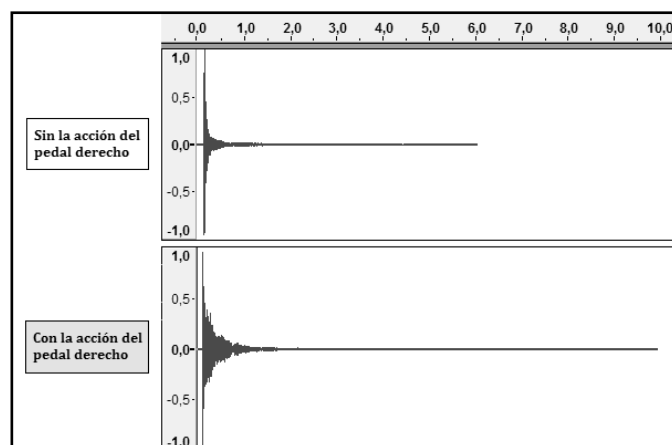


Figura 3.102. Comparativa de la nota Do7 tocada sin y con la acción del pedal derecho.

En los 4 casos expuestos anteriormente cuando la nota ha sido interpretada con el accionamiento del pedal derecho, se percibe un aumento del tiempo de caída de la nota en cuestión así como un incremento de la contribución energética de la misma. Este aumento de la energía sonora es más patente en la región grave del piano debido a que las notas de menor frecuencia tienen “más fuerza” para excitar al resto de cuerdas del instrumento (ahora con los apagadores levantados) que la que pueden infringir las notas más agudas del mismo.

#### 4.8.1.3.2. Espectro frecuencial

En la **tabla 3.43** se detalla la contribución energética en bandas de 1/3 de octavas de las notas Do1, Do3, Do5 y Do7 interpretadas sin y con el accionamiento del pedal derecho. Los valores de cada altura sonora se presentan en niveles relativos [dBr], figurando sombreadas en color celeste las bandas de mayor energía sonora a las que se les asignará el valor de 0,0 dB.

Comparativa: Varias notas interpretadas sin y con el accionamiento del pedal derecho								
Frec. (Hz) (en bandas de 1/3 de octavas)	Niveles sonoros [dBr]							
	Do1 = 32,7 Hz		Do3 = 130,8 Hz		Do5 = 523,3 Hz		Do7 = 2.093 Hz	
	SIN PEDAL	CON PEDAL	SIN PEDAL	CON PEDAL	SIN PEDAL	CON PEDAL	SIN PEDAL	CON PEDAL
25	-32,7	-30,5	-37,1	-34,5	-31,8	-39,5	-32,2	-36,2
31,5	-26,5	-22,2	-35,2	-30,5	-29,8	-34,8	-33,7	-30,1
40	-32,6	-26,6	-41,3	-32,1	-39,8	-38,8	-39,2	-27,9
50	-28,9	-22,3	-40,0	-31,4	-38,1	-39,1	-35,3	-26,0
63	-6,7	-2,0	-33,0	-25,1	-28,1	-26,9	-21,9	-18,6
80	-20,9	-15,6	-29,2	-24,4	-27,6	-27,8	-21,8	-16,3
100	-14,0	-4,8	-29,1	-20,6	-27,6	-29,4	-23,0	-21,8
125	-4,4	<b>0,0</b>	-9,3	<b>0,0</b>	-27,8	-23,8	-24,2	-19,5
160	<b>-3,4</b>	-0,7	-25,0	-16,1	-30,8	-33,2	-31,6	-26,8
200	-10,5	-9,3	-27,9	-23,5	-31,0	-31,2	-30,7	-22,7
250	-11,9	-6,1	<b>-3,2</b>	-2,4	-30,3	-34,9	-30,0	-25,3
315	-16,5	-8,4	-21,6	-21,1	-31,0	-31,2	-25,9	-25,2
400	-9,8	-3,6	-7,2	-1,2	-23,7	-25,8	-29,4	-28,5
500	-8,6	-3,4	-13,0	-16,2	<b>-5,1</b>	<b>0,0</b>	-30,0	-29,3
630	-15,0	-11,8	-17,9	-13,3	-20,2	-21,8	-27,6	-27,4
800	-13,5	-15,9	-10,9	-10,0	-29,3	-31,4	-24,3	-22,3
1000	-11,8	-6,0	-8,5	-12,9	-11,3	-9,8	-14,9	-18,7
1250	-18,1	-12,0	-12,9	-17,3	-33,1	-30,3	-18,0	-16,1
1600	-22,4	-20,1	-18,4	-17,9	-13,3	-13,9	-15,9	-18,7
2000	-26,9	-21,9	-13,7	-19,1	-24,1	-19,0	<b>-2,6</b>	<b>0,0</b>
2500	-31,1	-26,7	-28,1	-24,6	-16,3	-20,0	-23,3	-21,8
3150	-38,0	-31,5	-31,8	-25,9	-29,2	-24,9	-29,2	-28,4

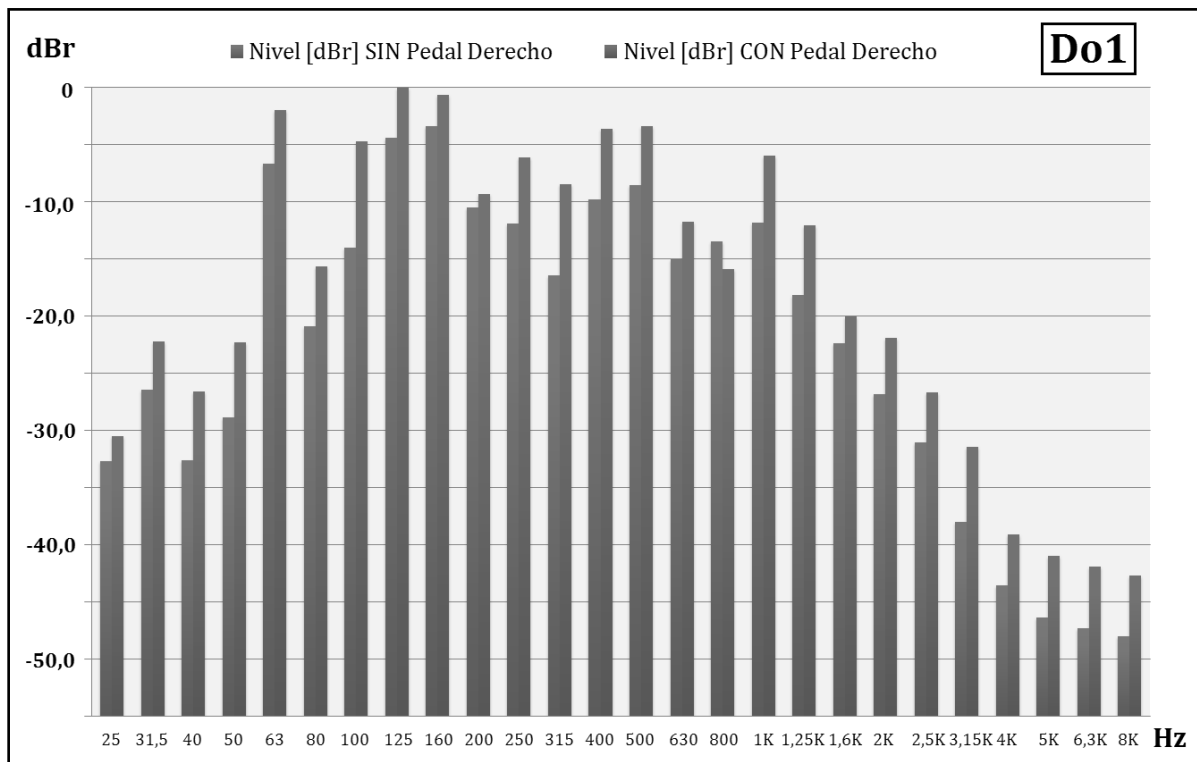


<b>4000</b>	-43,6	-39,1	-37,2	-35,4	-41,1	-30,8	-28,1	-16,1
<b>5000</b>	-46,4	-41,0	-47,7	-44,4	-51,8	-40,5	-37,7	-39,1
<b>6300</b>	-47,3	-41,9	-48,5	-45,5	-52,3	-41,5	-40,7	-38,4
<b>8000</b>	-48,0	-42,7	-52,9	-47,8	-54,8	-48,2	-51,6	-50,2
<b>10000</b>					-55,1	-49,6	-54,5	-47,5
<b>12500</b>					-55,4	-50,2	-55,4	-55,4
<b>16000</b>							-75,5	-55,5
<b>20000</b>							-54,0	-50,8

**Tabla 3.43.** Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de las notas Do1, Do3, Do5 y Do7 interpretada sin y con el accionamiento del pedal derecho.

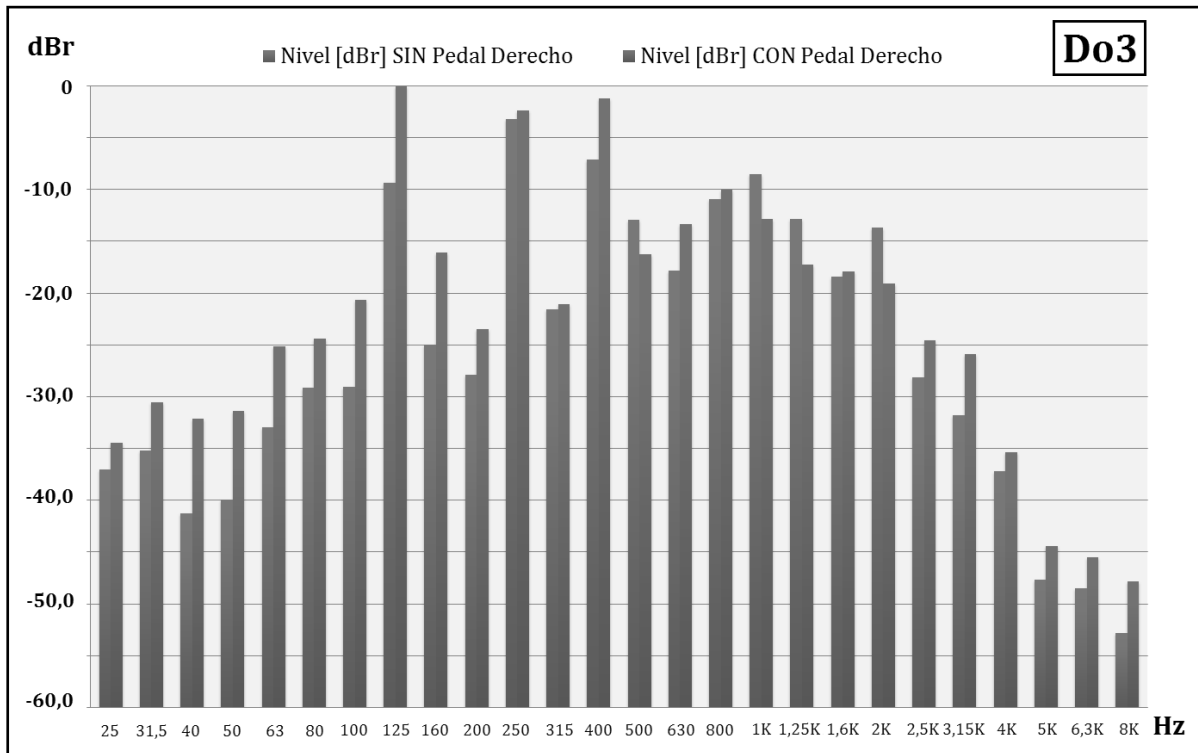
Los valores recogidos en la anterior tabla se representan de manera gráfica en las siguientes **figuras 3.103, 3.104, 3.105 y 3.106**.

▪ **Nota musical: Do1**



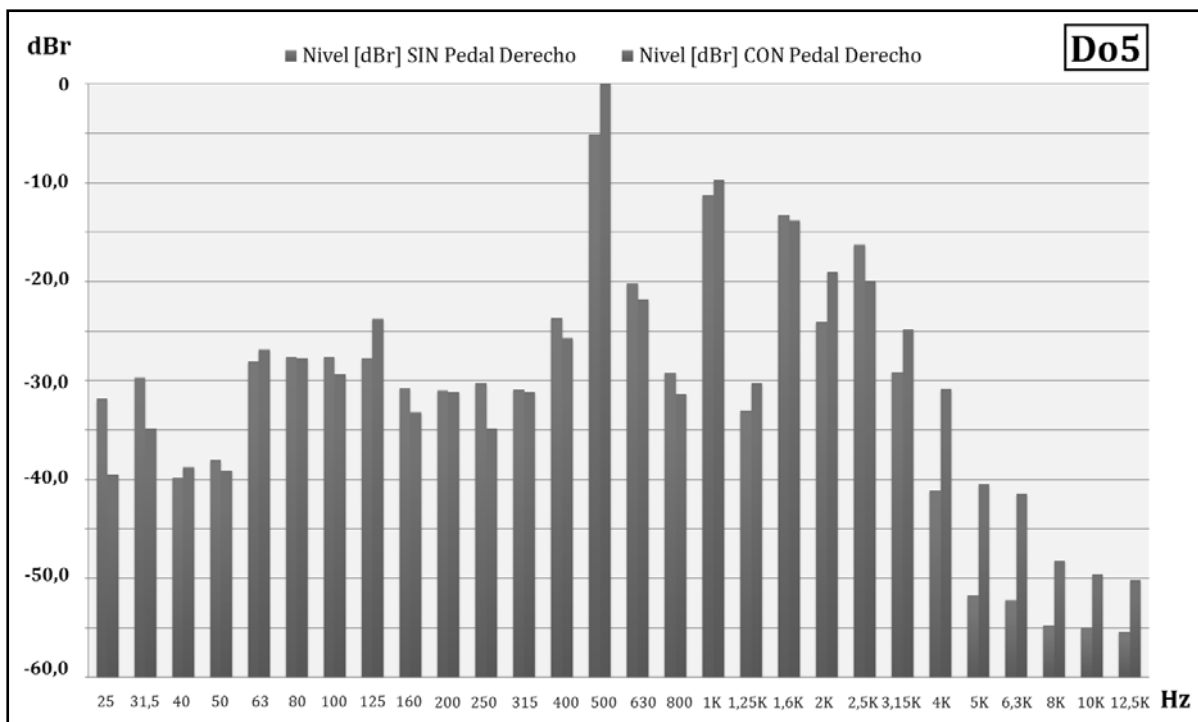
**Figura 3.103.** Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de la nota Do1 tocada sin y con el accionamiento del pedal derecho.

▪ **Nota musical: Do3**



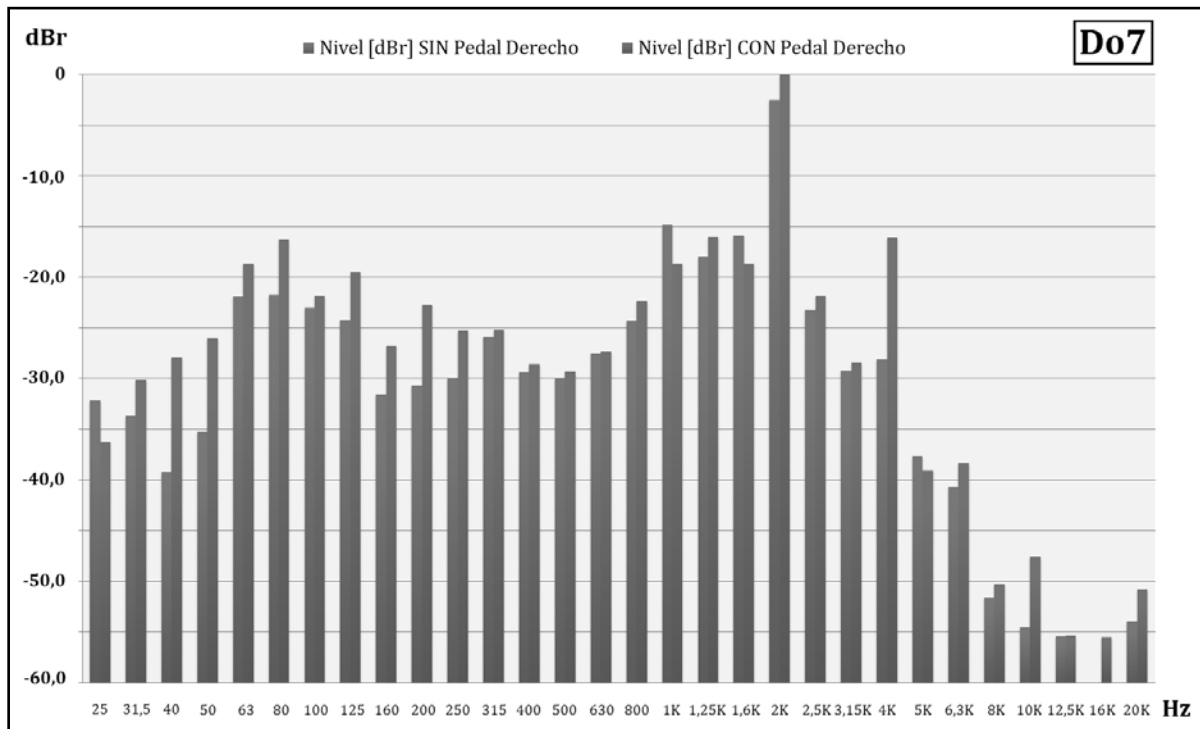
**Figura 3.104.** Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de la nota Do3 tocada sin y con el accionamiento del pedal derecho.

▪ **Nota musical: Do5**



**Figura 3.105.** Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de la nota Do5 tocada sin y con el accionamiento del pedal derecho.

▪ **Nota musical: Do7**

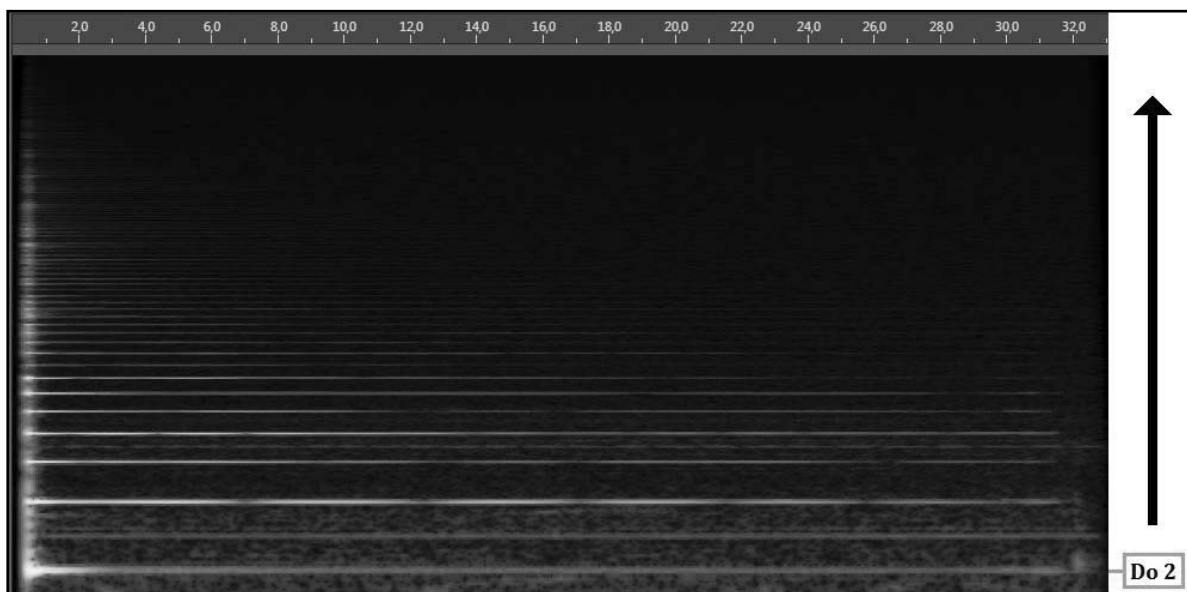


**Figura 3.106.** Contribución energética en bandas de 1/3 de octava de la nota Do7 tocada sin y con el accionamiento del pedal derecho.

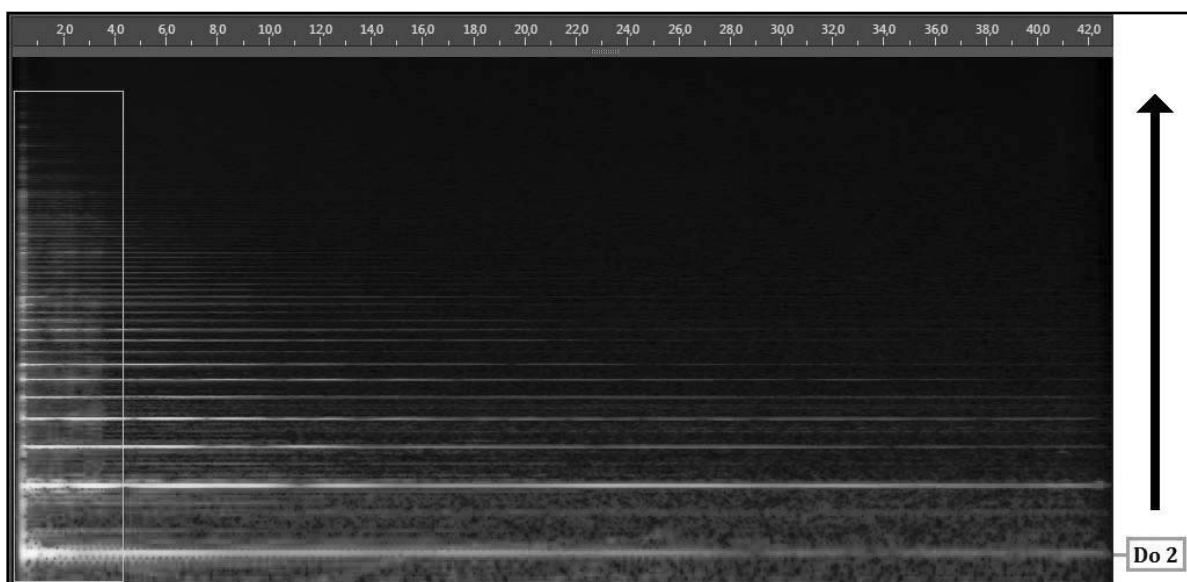
El análisis de los datos presentados conduce a la afirmación de que en la mayoría de bandas de 1/3 de octavas, con independencia de la nota musical, los eventos sonoros interpretados con el pedal derecho presentan un mayor nivel sonoro en comparación con las muestras sin el accionamiento de dicho pedal. Dicho aumento es visible en las frecuencias superiores a la frecuencia fundamental de la nota interpretada así como en las inferiores.

**4.8.1.3.3. Espectrogramas**

Con el objetivo de averiguar la evolución de la contribución energética a lo largo del tiempo se selecciona la nota Do2 (65,4 Hz) y se analiza su espectrograma en condiciones normales (**figura 3.107**) y con el pedal derecho accionado (**figura 3.108**).



**Figura 3.107.** Espectrograma de la nota Do2 interpretada sin el accionamiento del pedal derecho.



**Figura 3.108.** Espectrograma de la nota Do2 interpretada con el accionamiento del pedal derecho.

Se observa como al tener accionado el pedal derecho el espectro sonoro de la nota sufre modificaciones, evidenciando los armónicos una mayor intensidad sonora y existiendo mayor cantidad de energía sonora en las diferentes regiones situadas entre dichos armónicos, especialmente en los primeros momentos del evento sonoro (véase recuadro verde en la **figura 3.108**).

#### 4.8.1.4. Discusión de los resultados

El accionamiento del pedal derecho conlleva un incremento del tiempo de caída de las notas afectadas, un aumento de la contribución energética de las mismas y una modificación del timbre resultante debido a la adicción de componentes frecuenciales pertenecientes a las vibraciones del resto de cuerdas que oscilan por simpatía al estar los apagadores de todas las notas del piano levantados.

El incremento de la energía sonora generada es mayor cuando las notas interpretadas con el pedal derecho pulsado pertenecen al registro grave del instrumento, ya que estas excitan con más facilidad a las demás cuerdas.

Si se analiza el espectro armónico a lo largo del tiempo de una nota tocada mientras el pedal derecho se encuentra accionado, se observa como los armónicos presentan una mayor intensidad sonora y existe una mayor cantidad de energía sonora en las diferentes zonas situadas entre dichos armónicos especialmente en los primeros momentos del evento sonoro, así como en frecuencias inferiores al armónico fundamental de la misma.

### 4.8.2. Pedal izquierdo

#### 4.8.2.1. Introducción

El pedal izquierdo del piano de cola, también denominado *una corda*, desplaza lateralmente todos los martillos para que estos percutan una cantidad de cuerdas menor de lo habitual. En el caso de las notas que poseen tres cuerdas, los martillos golpean sobre dos de ellas; cuando las notas tienen dos cuerdas, estos percuten una sola y cuando son cuerdas individuales los martillos inciden en ellas con el borde del fieltro. Las cuerdas no percutidas de la nota empezarán a vibrar en oposición de fase debido a la transmisión a través del puente.

En un piano de cola este pedal no ejerce de una manera tan evidente el efecto de disminuir la potencia total del sonido, tal y como sí sucede en los pianos verticales. La potencia del sonido inmediato sí se reduce ya que menos cuerdas participan en él. No obstante, el nivel sonoro de su resonancia es superior respecto a la percusión normal sin el accionamiento del pedal izquierdo ya que las cuerdas que no han sido percutidas vibran por simpatía sin ninguna influencia de la amortiguación fruto del contacto con el martillo [27].

Esto se traduce en una transformación del timbre del instrumento debido a la diferencia de fase en la vibración de las cuerdas y al aumento de la proporción de la resonancia con respecto al sonido inmediato proporcionando un sonido más ‘dulce’.

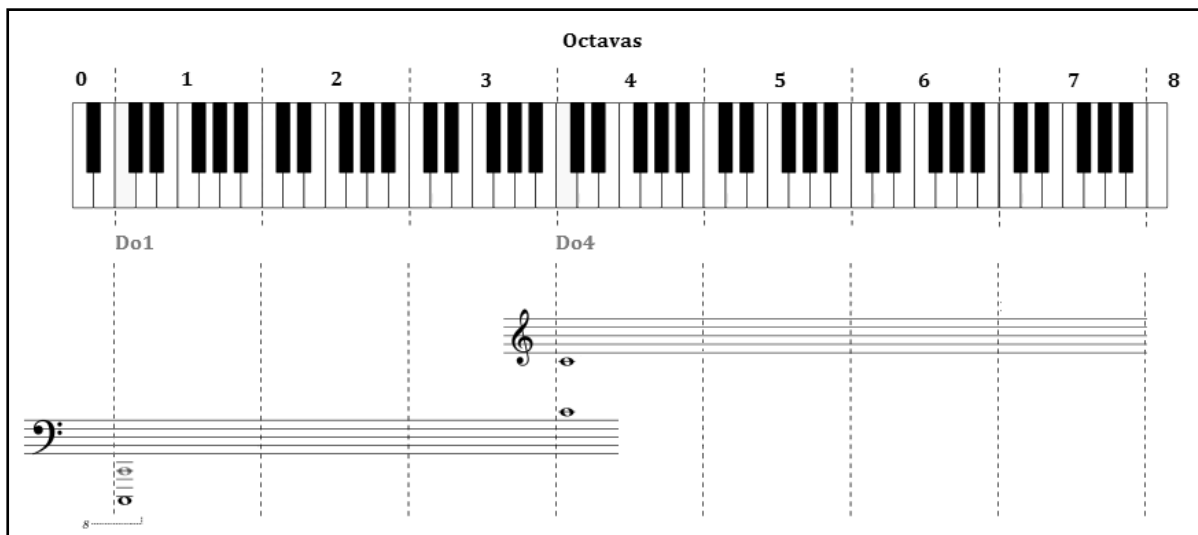
El funcionamiento y los efectos causados por este pedal se describen de manera más exhaustiva en el apartado 4.5.1 del **Anexo I.D.**

#### 4.8.2.2. Descripción del método analítico

Para realizar el estudio se eligen 2 notas (véase **tabla 3.44** y **figura 3.109**). En primer lugar la nota se toca sin la acción del pedal izquierdo y posteriormente se interpreta pisando dicho pedal.

Muestras sonoras empleadas para el estudio de la acción del pedal izquierdo (una <i>corda</i> )			
Notas musicales	Frecuencia	Pedal izquierdo	Pistas CD audio
Do1	32,7 Hz	Sin y con	048
Do4	261,6 Hz	Sin y con	054

**Tabla 3.44.** Registros sonoros utilizados para el estudio del pedal izquierdo.



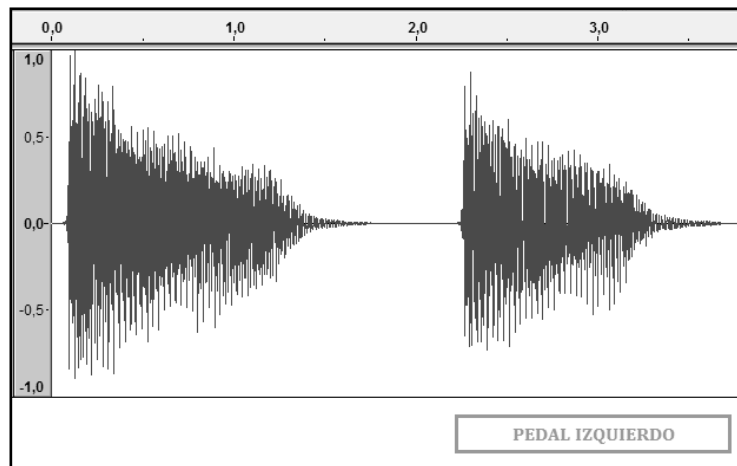
**Figura 3.109.** Notas musicales escogidas para estudiar el efecto del pedal izquierdo.

### 4.8.2.3. Resultados obtenidos

#### 4.8.2.3.1. Forma de onda

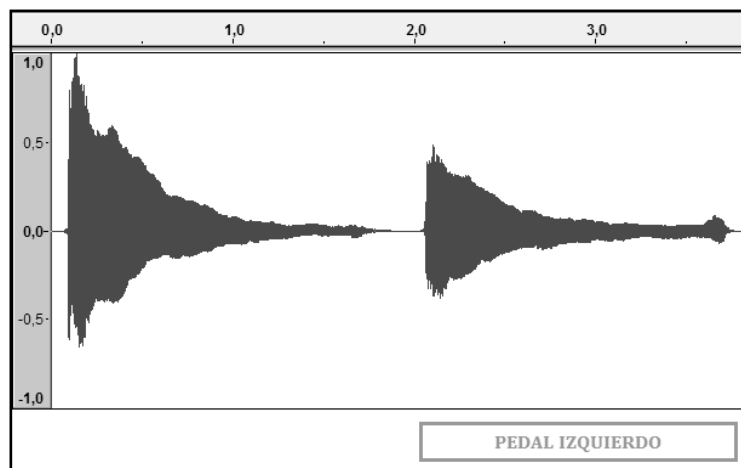
A continuación se exponen las gráficas comparativas de las formas de onda obtenidas al interpretar las notas musicales Do1 y Do4 sin y con el accionamiento del pedal izquierdo.

- **Nota musical: Do1**



**Figura 3.110.** Formas de onda de la nota Do1 tocada sin y con el accionamiento del pedal izquierdo.

- **Nota musical: Do4**



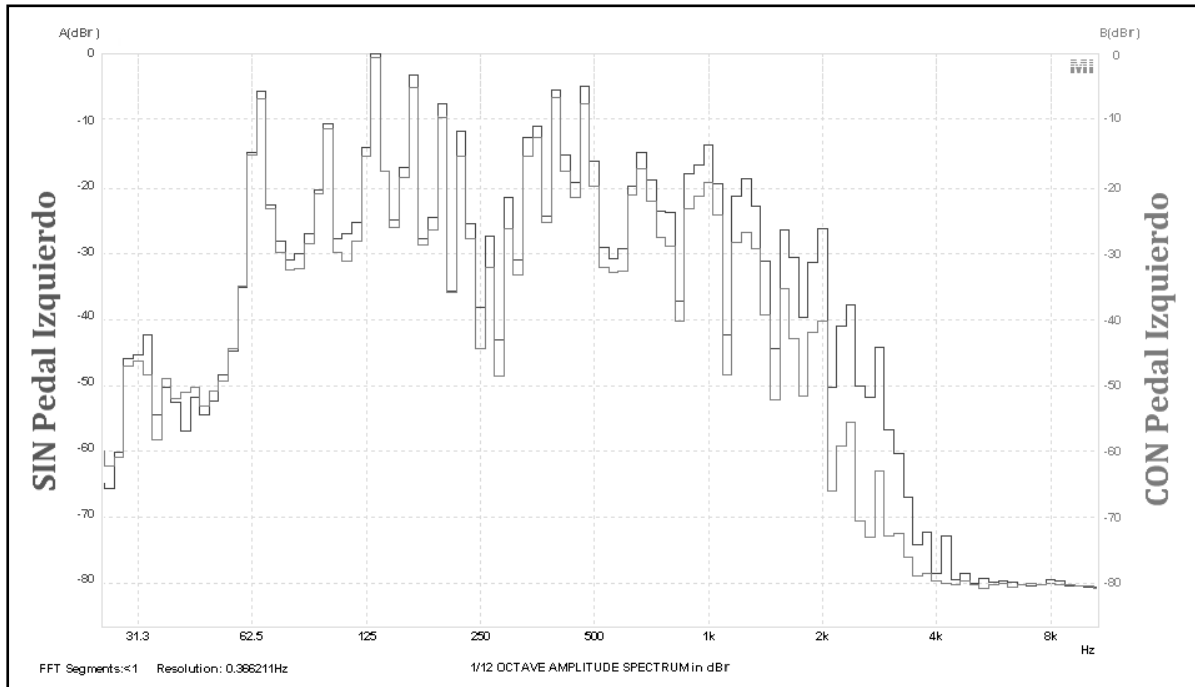
**Figura 3.111.** Formas de onda de la nota Do4 tocada sin y con el accionamiento del pedal izquierdo.

En ambas alturas musicales se observa una disminución de la contribución energética total de la nota cuando el pedal izquierdo se encuentra pulsado. Por otra parte, las formas de ondas de la nota Do1 muestran una proporción de la resonancia con respecto al sonido inmediato similar en ambos casos (sin y con el accionamiento del pedal izquierdo). Sin embargo, en el caso de la nota Do4 el efecto de la doble caída de su envolvente es menos evidente cuando esta es tocada con el pedal.

#### 4.8.2.3.2. Espectro frecuencial

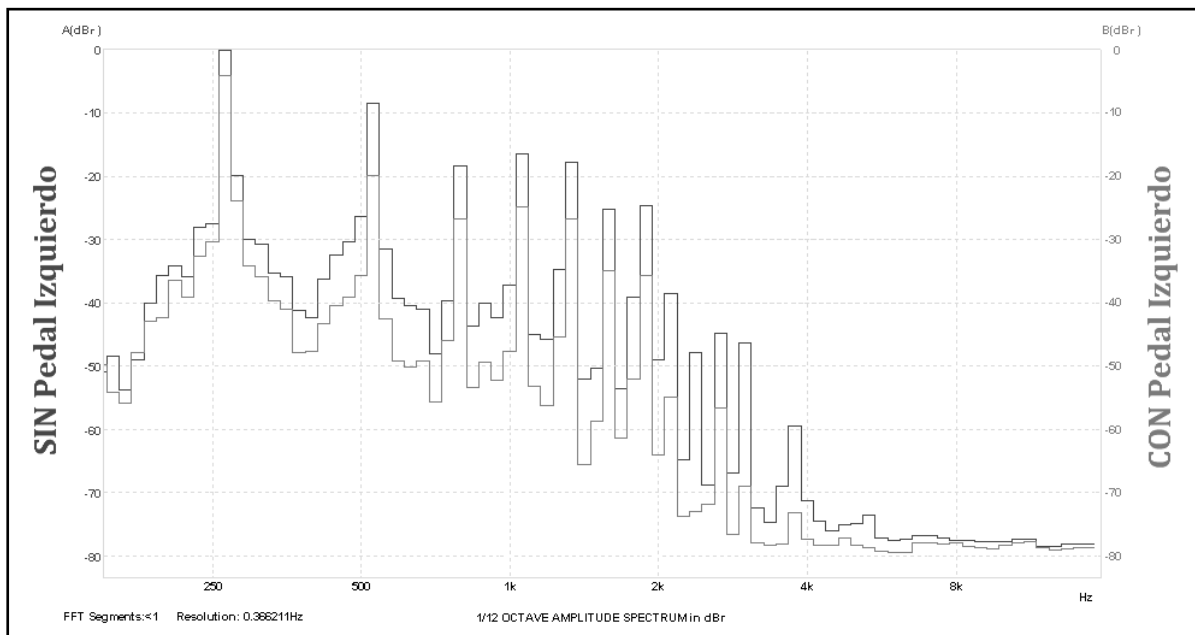
En las siguientes **figuras 3.112 y 3.113** se presentan las contribuciones energéticas en bandas de 1/12 de octava de las notas Do1 y Do4 tocadas sin y con el pedal izquierdo.

- **Nota musical: Do1**



**Figura 3.112.** Contribución energética en bandas de 1/12 de octava de la nota Do1 tocada sin y con el accionamiento del pedal izquierdo.

- **Nota musical: Do4**



**Figura 3.113.** Contribución energética en bandas de 1/12 de octavas de la nota Do4 tocada sin y con el accionamiento del pedal izquierdo.



#### 4.8.2.4. Discusión de los resultados

El accionamiento del pedal izquierdo del piano de cola genera una disminución de la contribución energética total de las notas afectadas. El perfil de las envolventes de dichas notas también sufre modificaciones, sobre todo en el registro medio del instrumento, en donde se observa una atenuación del efecto de la doble caída.

Examinando el espectro frecuencial de las notas tocadas mientras el pedal izquierdo se encuentra pisado, se aprecia un comportamiento similar al mostrado por las alturas interpretadas sin la influencia de dicho pedal en *p* o *pp* (véase apartado 4.7 de la presente Memoria). El accionamiento del pedal *una corda* provoca una caída más acelerada del nivel sonoro de los armónicos superiores de las notas musicales.

#### 4.8.3. Pedal central

##### 4.8.3.1. Introducción

El efecto que produce el pedal central del piano de cola, también denominado tonal, es conocido con el nombre de *nota pedal*. Consiste en mantener en vibración ciertas notas mediante la elevación de sus correspondientes apagadores. Esto se consigue pulsando las notas cuyos sonidos se desean mantener y, antes de levantar los dedos de las teclas, pisar el pedal central. Mientras se mantenga accionado el pedal estas seguirán sonando hasta que la vibración se extinga por sí misma a pesar de que las teclas ya se hayan elevado. El hecho que diferencia este pedal del de resonancia es que no afecta a las notas que se toquen después de que este haya sido pisado.

El funcionamiento y los efectos ocasionados por este pedal se desarrollan en el apartado 4.5.3 del **Anexo I.D.**

##### 4.8.3.2. Descripción del método analítico

Para llevar a cabo el estudio se seleccionan 2 parejas de alturas musicales (véase **tabla 3.45** y **figura 3.116**). La primera de ellas está formada por un sonido grave seguido de uno agudo, y la segunda por uno de alta frecuencia y posteriormente uno de baja frecuencia.

La interpretación de cada pareja de alturas tiene lugar siguiendo los siguientes pasos:

- Se toca la primera nota, manteniendo la tecla bajada hasta poco después de que se accione el pedal central.
- Se pulsa el pedal central y se mantiene accionado.
- Se retira el dedo de la tecla de la primera nota y se pulsa la segunda.

De esta manera, el sonido de la primera altura musical permanecerá hasta la extinción de la vibración por sí misma (sin la influencia de los apagadores), mientras que el de la segunda solo se mantendrá el tiempo que esté bajada su tecla.

Muestras sonoras empleadas para el estudio de la acción del pedal central (tonal)		
Notas musicales	Frecuencia	Pistas CD audio
Sol3 - Sol5	196,0 Hz - 740,0 Hz	067
Sol6 - Sol2	1.568,0 Hz - 98,0 Hz	068

Tabla 3.45. Registros sonoros utilizados para el estudio del pedal central.

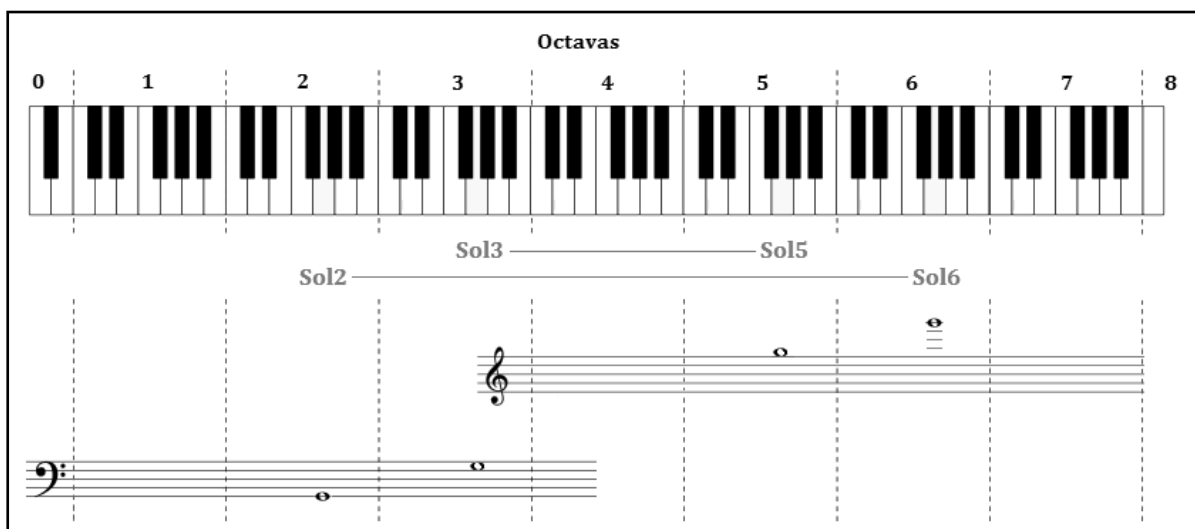


Figura 3.116. Notas musicales escogidas para estudiar el efecto del pedal central.

### 4.8.3.3. Resultados obtenidos

- **Notas musicales: Sol 3 – Sol 5 (Grave – Agudo)**

- **Forma de onda**

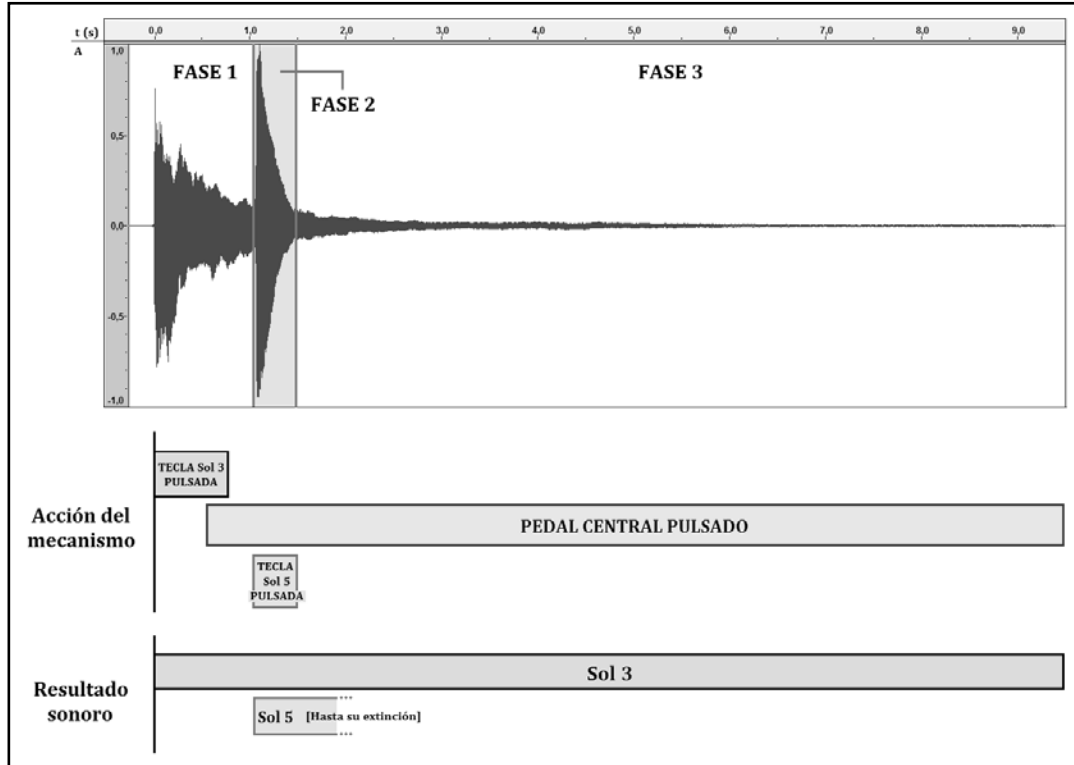


Figura 3.117. Forma de onda del registro sonoro Sol3-Sol5.

- **Espectro armónico con las 3 fases superpuestas**

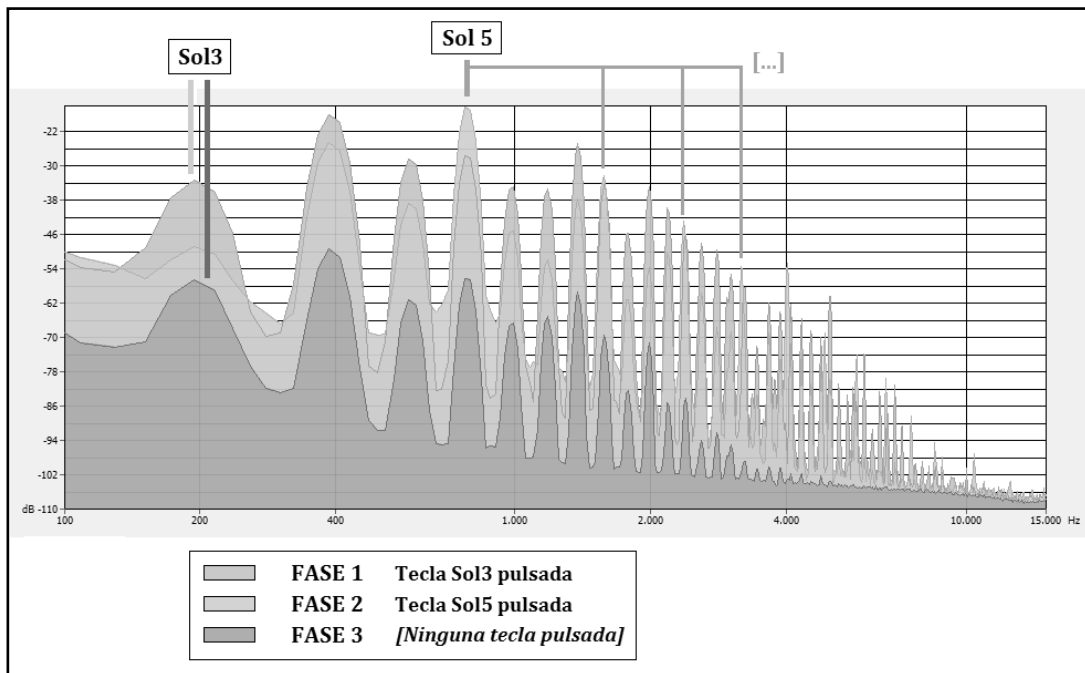


Figura 3.118. Espectro armónico de las 3 fases superpuestas del registro sonoro Sol3-Sol5.

• **Espectrograma**

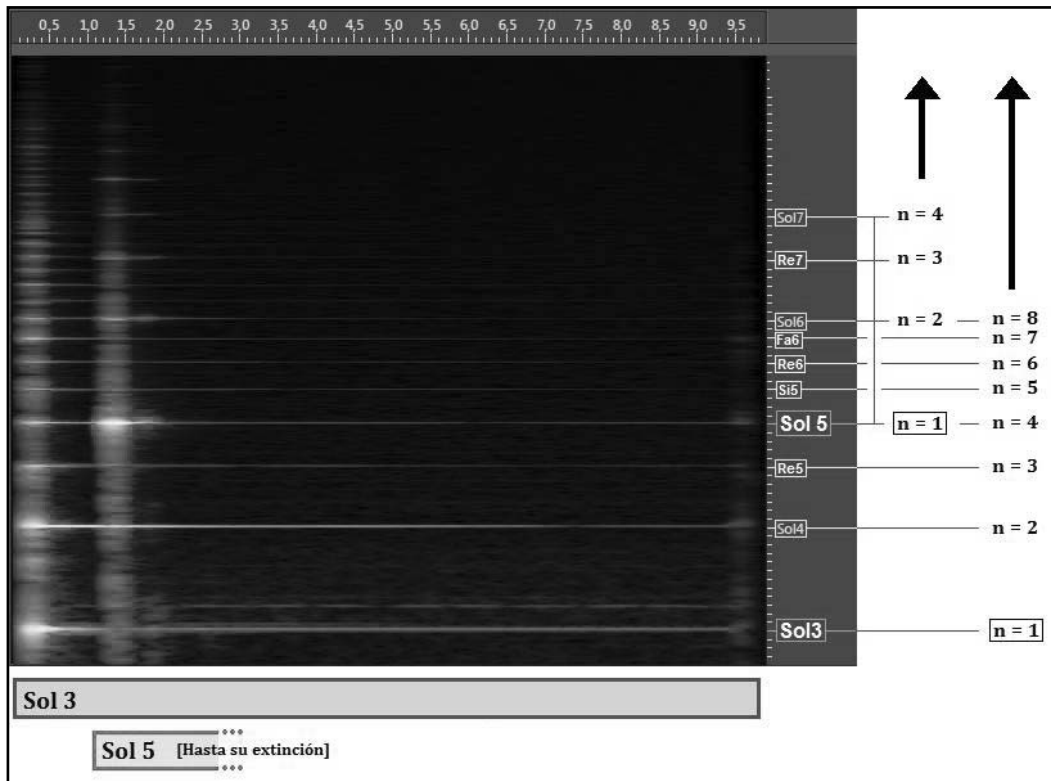


Figura 3.119. Espectrograma del registro sonoro Sol3-Sol5.

▪ **Notas musicales: Sol 6 – Sol 2 (Agudo – Grave)**

• **Forma de onda**

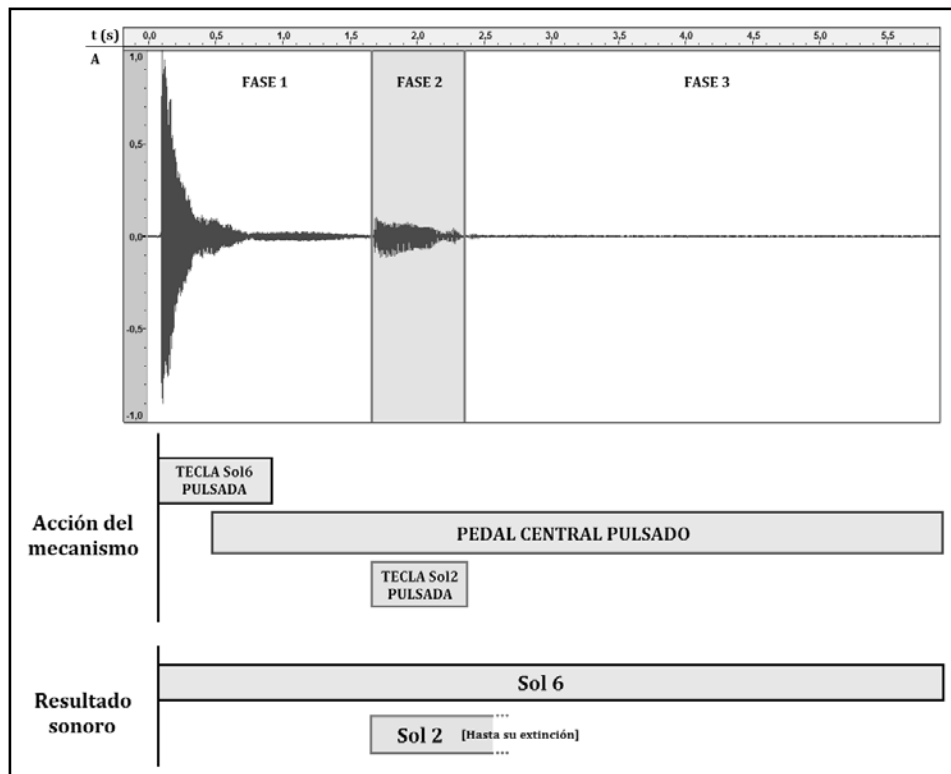


Figura 3.120. Forma de onda del registro sonoro Sol6-Sol2.

• Espectro armónico con las 3 fases superpuestas

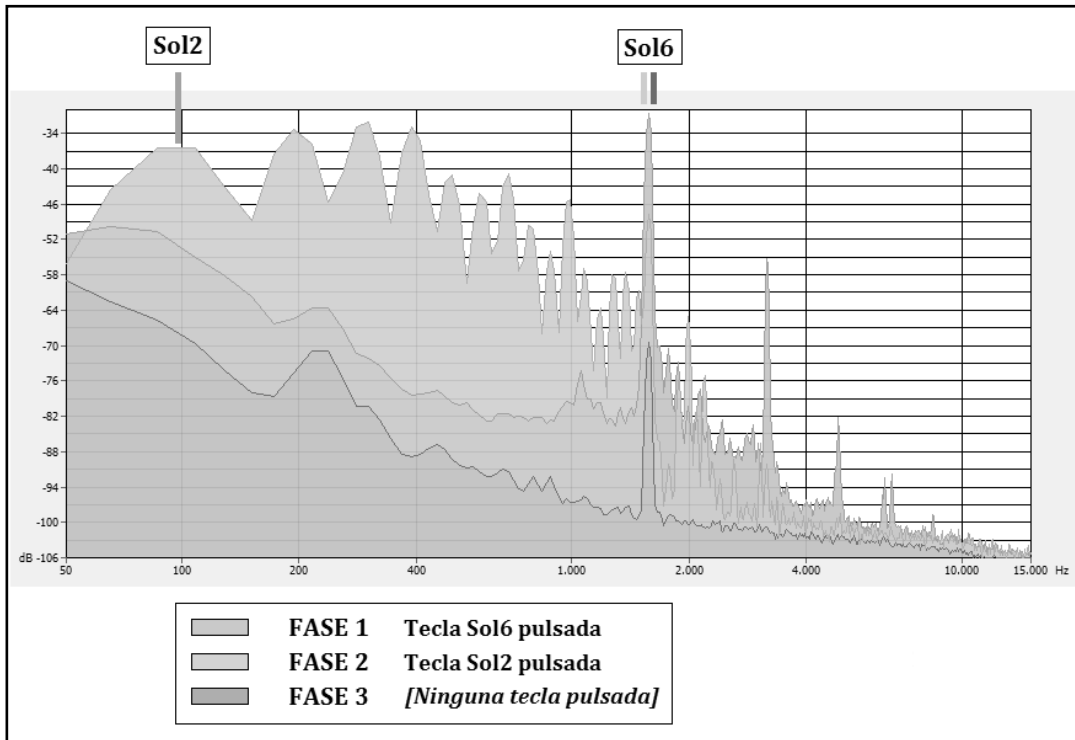


Figura 3.121. Espectro armónico de las 3 fases superpuestas del registro sonoro Sol3-Sol5.

• Espectrograma

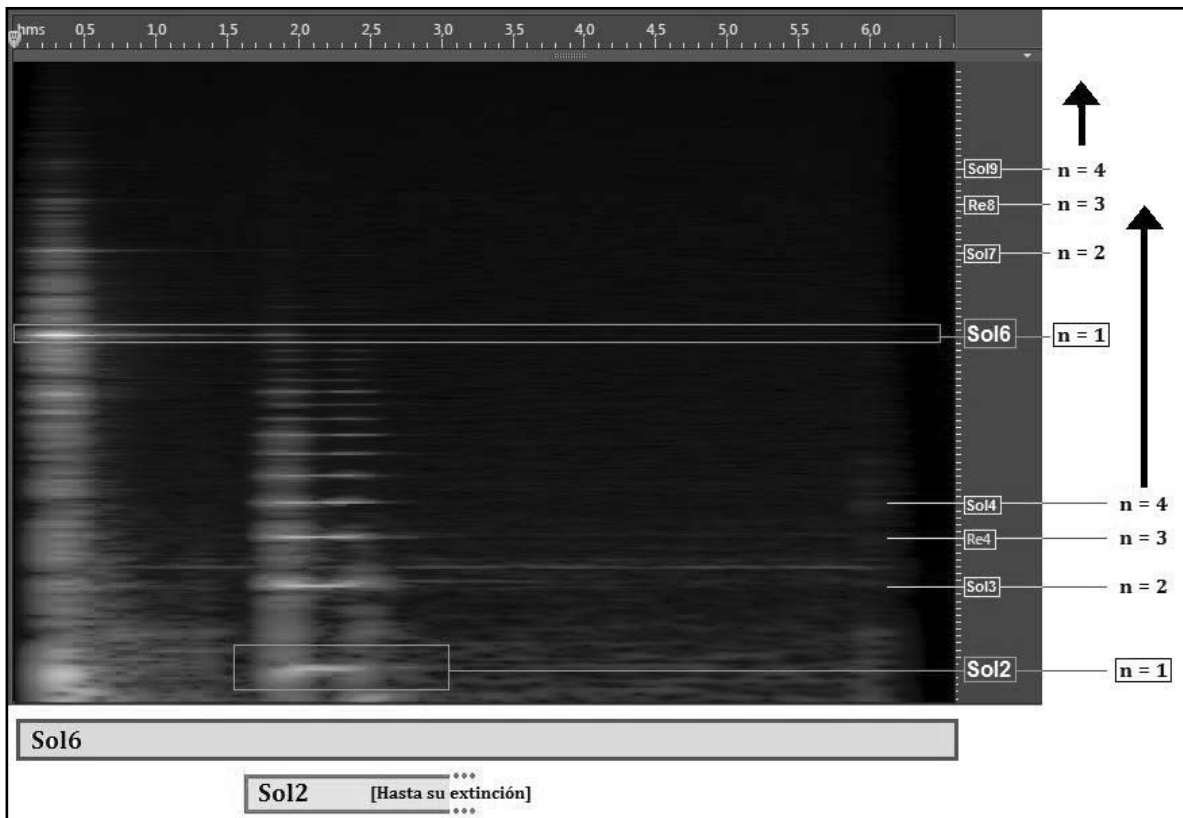


Figura 3.122. Espectrograma del registro sonoro Sol6-Sol2.

#### 4.8.3.4. Discusión de los resultados

El efecto del pedal central cumple mejor su cometido si las notas que se desean mantener sonando están situadas en el registro grave o medio del instrumento ya que estas contienen mayores niveles de energía y su sonido permanecerá más tiempo y a niveles sonoros más altos en comparación con las notas de frecuencias superiores. Si las notas que se quieren conservar vibrando pertenecen al registro agudo del piano estas podrán ser enmascaradas con mayor facilidad por los sonidos que tengan lugar posteriormente.

### 4.8.4. Comparativa entre los pedales derecho e izquierdo

#### 4.8.4.1. Introducción

Tras haber estudiado en los anteriores apartados el comportamiento de cada uno de los pedales de forma independiente, se procede a realizar una comparativa entre ellos.

A continuación se analizan los efectos de los pedales derecho e izquierdo y las posibles combinaciones entre ambos teniendo como marco común un mismo fragmento musical.

#### 4.8.4.2. Descripción del método analítico

Se ha registrado el fragmento musical mostrado en la **figura 3.123** correspondiente al comienzo del 2º movimiento de la sonata para piano de Beethoven Op. 27 nº 1.

Figura 3.123. Partitura del fragmento seleccionado (Fragmento 5).

Dicha pieza se tocó de cuatro diferentes formas, creando distintas combinaciones entre el uso del pedal derecho y del izquierdo:

- a. Se interpreta según las indicaciones presentes en la partitura sin accionar ningún pedal.
- b. Se emplea el pedal derecho. Este no se mantiene pulsado durante todo el fragmento ya que su uso excesivo o durante un tiempo prolongado puede provocar que el sonido se “ensucie” demasiado, es decir, que se pierda inteligibilidad debido a una gran resonancia. Por razones de interpretación esto no resulta aceptable, así que el pedal se ‘renueva’, esto es, se levanta y se vuelve a pulsar cuando el intérprete lo considera oportuno según la sensación sonora que desee producir. En este caso en concreto, estos recambios de pedal se producen cada compás, coincidiendo con los cambios de acordes de la obra.
- c. Se tocó manteniendo accionado el pedal izquierdo durante todo el fragmento.
- d. El pedal izquierdo se conserva pisado desde el principio del fragmento y además se hace uso del pedal derecho tal y como se indicó en la forma b.

En la **Tabla 3.46** se presenta un cuadro resumen donde se reflejan los audios grabados con un breve comentario de sus características principales así como la pista del CD que le corresponde.

Muestras sonoras empleadas para la comparativa de los efectos producidos por los pedales derecho e izquierdo		
Descripción		Pista CD audio
a	Sin ningún pedal	073
b	Pedal derecho	075
c	Pedal izquierdo +	076
d		Pedal derecho

**Tabla 3.46.** Registros sonoros utilizados para la comparativa entre los pedales derecho e izquierdo.

Se examinará la información extraída las formas de onda de cada uno de los registros sonoros así como la dilucidada mediante el análisis espectral de los mismos.

### 4.8.4.3. Resultados obtenidos

#### 4.8.4.3.1. Forma de onda

En las **figuras 3.124 y 3.125** se muestran consecutivamente las formas de onda de los registros sonoros a, b, c y d.

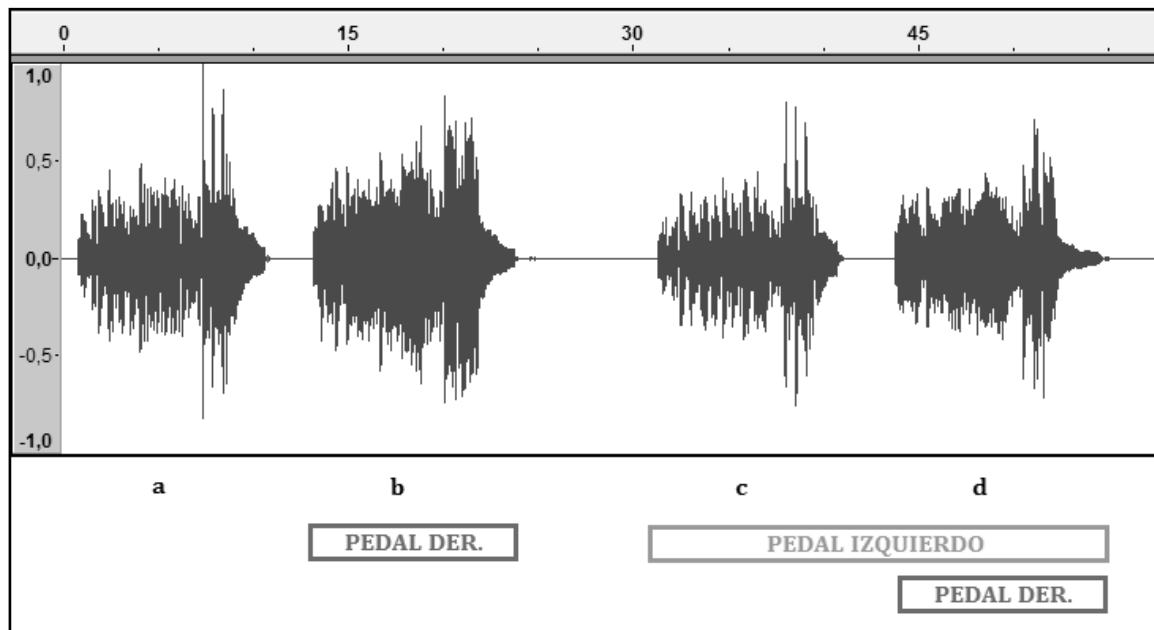


Figura 3.124. Formas de onda de los registros sonoros a, b, c y d.

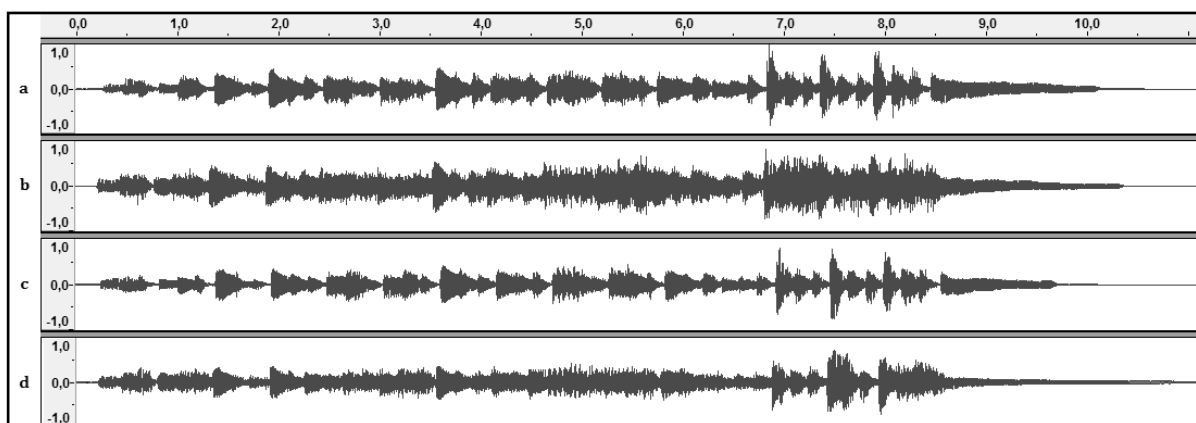


Figura 3.125. Formas de onda de los registros sonoros a, b, c y d.

#### 4.8.4.3.2. Espectro frecuencial

Al analizar la contribución espectral de los fragmentos a, b, c y d completos se observa que los espectros resultantes de todas las tomas tienden a ser muy semejantes, en cuanto a la distribución energética entre las distintas bandas de frecuencias, ya que la longitud de los eventos sonoros es considerable y se reproducen en cada uno de ellos una gran variedad y cantidad de notas musicales. Sin embargo, se aprecia que el fragmento b es el que genera una mayor contribución energética, seguido del a, d y c.

#### 4.8.4.4. Discusión de los resultados

Mediante la observación de las **figuras 3.124** y **3.125** se extraen varias conclusiones acerca de la influencia de los pedales derecho e izquierdo:



- **Efecto del pedal derecho.** El accionamiento de este pedal produce un aumento del nivel sonoro global de los fragmentos afectados. Además de esto, se observa en las formas de onda de las muestras sonoras interpretadas empleando el pedal derecho una mayor densidad del color azul debido a la superposición de los distintos sonidos producidos puesto que las notas musicales se mantienen más tiempo sonando como resultado de que los apagadores no bajen a parar la excitación de las cuerdas una vez las teclas dejan de estar pulsadas.
- **Efecto del pedal izquierdo.** Sin entrar en mediciones exactas acerca de los niveles sonoros alcanzados por cada una de las muestras, se observa como las muestras c y d tienen una amplitud sensiblemente inferior a la presentada por los audios a y b. Esto sucede ya que las tomas sonoras c y d son una analogía de la a y b con la diferencia de que han sido interpretadas manteniendo el pedal izquierdo accionado durante todo el fragmento.

## 4.9. Estudio de la directividad

### 4.9.1. Introducción

Las propiedades direccionales del piano son resultado de la interacción entre los patrones de radiación de la tabla armónica y la posición de la tapa superior del instrumento.

El efecto producido por los distintos ángulos de apertura de la tapa es muy dependiente de la frecuencia de la radiación sonora emitida, incrementándose conforme los sonidos sean más agudos. Para radiaciones de muy bajas frecuencias, la tapa apenas ejerce influencia ya que las longitudes de onda de estas frecuencias son suficientemente largas para rodear la tapa.

En el apartado 4.4.4 del **Anexo I.D** se describen más minuciosamente dichas propiedades direccionales.

### 4.9.2. Descripción del método analítico

En Fletcher y Rossing (1998) [28] se muestran los modelos de directividad correspondientes al plano vertical de un piano de cola en condiciones de tapa superior abierta y cerrada. En el presente Estudio se conserva la idea de analizar las características direccionales del instrumento en esas dos condiciones (**figura 3.126**) pero el análisis se realiza en el plano horizontal.

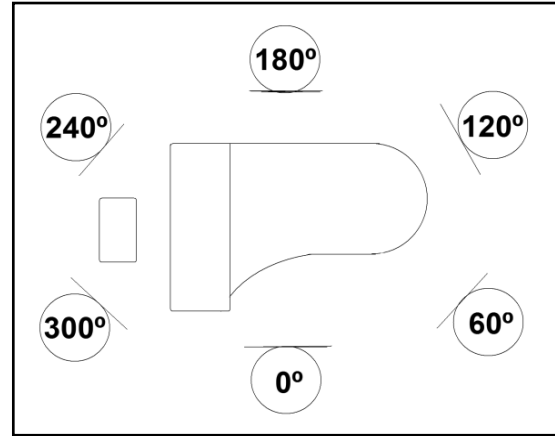


**Figura 3.126.** Posiciones de tapa abierta y tapa cerrada empleadas en el estudio de la directividad.

Tomando en consideración lo ejecutado en Pérez (2012) para instrumentos de cuerda frotada [18], en este Proyecto se han recogido datos en un menor número de posiciones a lo largo de la circunferencia descrita alrededor del piano. Concretamente se han situado un total de 6 micrófonos en los puntos señalados en las **figuras 3.127** y **3.128**, en comparación con los 36 puntos de medida designados en Pérez (2012).



**Figura 3.127.** Grabación de las muestras sonoras necesarias para el estudio de la directividad en condiciones de tapa abierta.



**Figura 3.128.** Posición de los 6 micrófonos alrededor del piano.

La principal razón de este contraste reside en la diferencia del planteamiento empleado en cada estudio, ya que Pérez emplea un único micrófono para la captación que va moviendo a cada punto de medida repitiendo el evento sonoro tantas veces como posiciones haya. Al igual que lo expuesto en la página web *Sound on sound* [29], en este Proyecto se ha decidido registrar un mismo evento sonoro simultáneamente en todas las posiciones posibles, quedando, por tanto, el número de posiciones de medida limitada a la cantidad de micrófonos del mismo modelo (en este caso Behringer C-3) de la que se disponía.

Tal y como se observa en la **figura 3.128**, a la hora de elaborar los diagramas polares de directividad se ha optado por realizar un giro en los ejes de representación con la finalidad de que visualmente los resultados sean más fáciles de interpretar. Esto supone que el ángulo  $0^\circ$  se coloca en la parte inferior del diagrama.

Para llevar a cabo del estudio de han grabado 3 fragmentos sonoros diferentes, cada uno de ellos focalizados en una zona del registro del instrumento (grave, media y aguda). Cada fragmento se ha interpretado en condiciones de tapa abierta y tapa cerrada.

### 4.9.3. Resultados obtenidos

#### 4.9.3.1. Registro grave

En la siguiente **tabla 3.47** se detallan las muestras sonoras utilizadas en el estudio de las características direccionales del piano para frecuencias graves.

Muestras sonoras empleadas en el estudio de la directividad (registro grave)				
Fragmento	Frecuencias	Tapa	Posición	Pistas CD audio
Fragmento 7	Sol#1 – Si 4 (53,9 Hz – 493,9 Hz)	Abierta	0°	093
			60°	094
			120°	095
			180°	096
			240°	097
			300°	098
		Cerrada	0°	099
			60°	100
			120°	101
			180°	102
			240°	103
			300°	104

Tabla 3.47. Registros sonoros utilizados para el estudio de la directividad del piano en el registro

#### 4.9.3.1.1. Tapa abierta

A continuación se muestra una comparación de las formas de onda del fragmento musical en estudio en cada una de las posiciones de medida en condiciones de tapa abierta. Con la finalidad de mejorar la visualización de las formas de ondas se han empleado valores relativos, es decir, al pico sonoro máximo existente (que en este caso se encuentra en el registro correspondiente al ángulo de 60°) se le ha asignado el valor de 0,0 dB. Los valores de amplitud sonora de cada una de las muestras sonoras se han incrementado pero siguen manteniendo las proporciones existentes entre ellos. Esto se ha llevado a cabo en todas las gráficas comparativas de formas de onda que se presentan en sucesivos apartados.

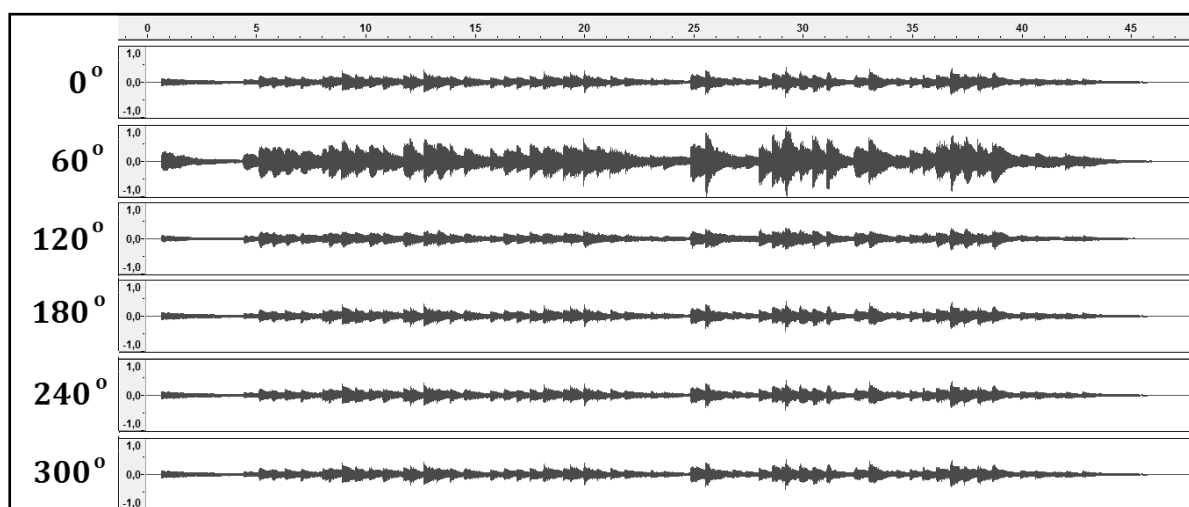
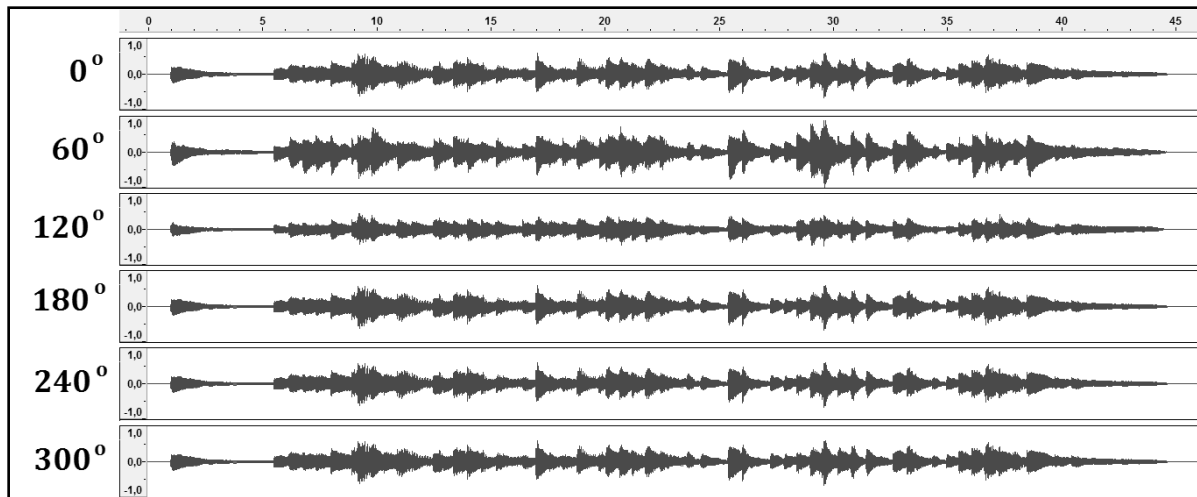


Figura 3.129. Formas de onda de los registros sonoros correspondientes al Fragmento 7 en condiciones de tapa abierta.

Se aprecia una evidente focalización de la energía sonora alrededor del ángulo horizontal de 60°.

#### 4.9.3.1.2. Tapa cerrada

En la siguiente **figura 3.130** se recogen las formas de onda del mismo fragmento musical esta vez en condiciones de tapa cerrada.



**Figura 3.130.** Formas de onda de los registros sonoros correspondientes al Fragmento 7 en condiciones de tapa cerrada.

La radiación sonora se presenta de manera más uniforme a lo largo de la circunferencia que rodea al instrumento, a pesar de que se observa un ligero incremento de la intensidad sonora en el ángulo de 60°.

#### 4.9.3.1.3. Comparación entre tapa abierta y cerrada

Con el objetivo de realizar un análisis más exhaustivo de la distribución de la energía sonora producida por el piano de cola en el espacio que lo rodea se eligen 2 bandas de frecuencias, en este caso la de 50 Hz y 160 Hz, y se estudia cómo se irradian dichas frecuencias alrededor del instrumento.

Cuando se toca una obra musical y la tapa superior del piano se encuentra cerrada, los sonidos generados por el instrumento tendrán un nivel sonoro global menor que los obtenidos de la idéntica interpretación de la misma pieza en condiciones de tapa abierta. El sonido resultante con la tapa cerrada tendrá una menor intensidad sonora y un timbre más oscuro.

Esto se confirma al analizar los datos derivados de las mediciones efectuadas. El nivel máximo de intensidad sonora del fragmento tocado con la tapa superior cerrada es 4,1 dB menor que el perteneciente a la interpretación con tapa en posición abierta.

No obstante, en este Estudio interesa más conocer la caída de la energía sonora dependiendo del ángulo horizontal de medida respecto al punto de mayor nivel sonoro. Por ello, se emplean valores relativos tanto en condiciones de tapa abierta como cerrada, asignándole al mayor nivel sonoro medido el valor de 0,0 dB.

En la siguiente **tabla 3.48** y **figura 3.131** se muestran los resultados obtenidos a las bandas de 1/3 de octavas con frecuencias centrales en 50 Hz y 160 Hz.

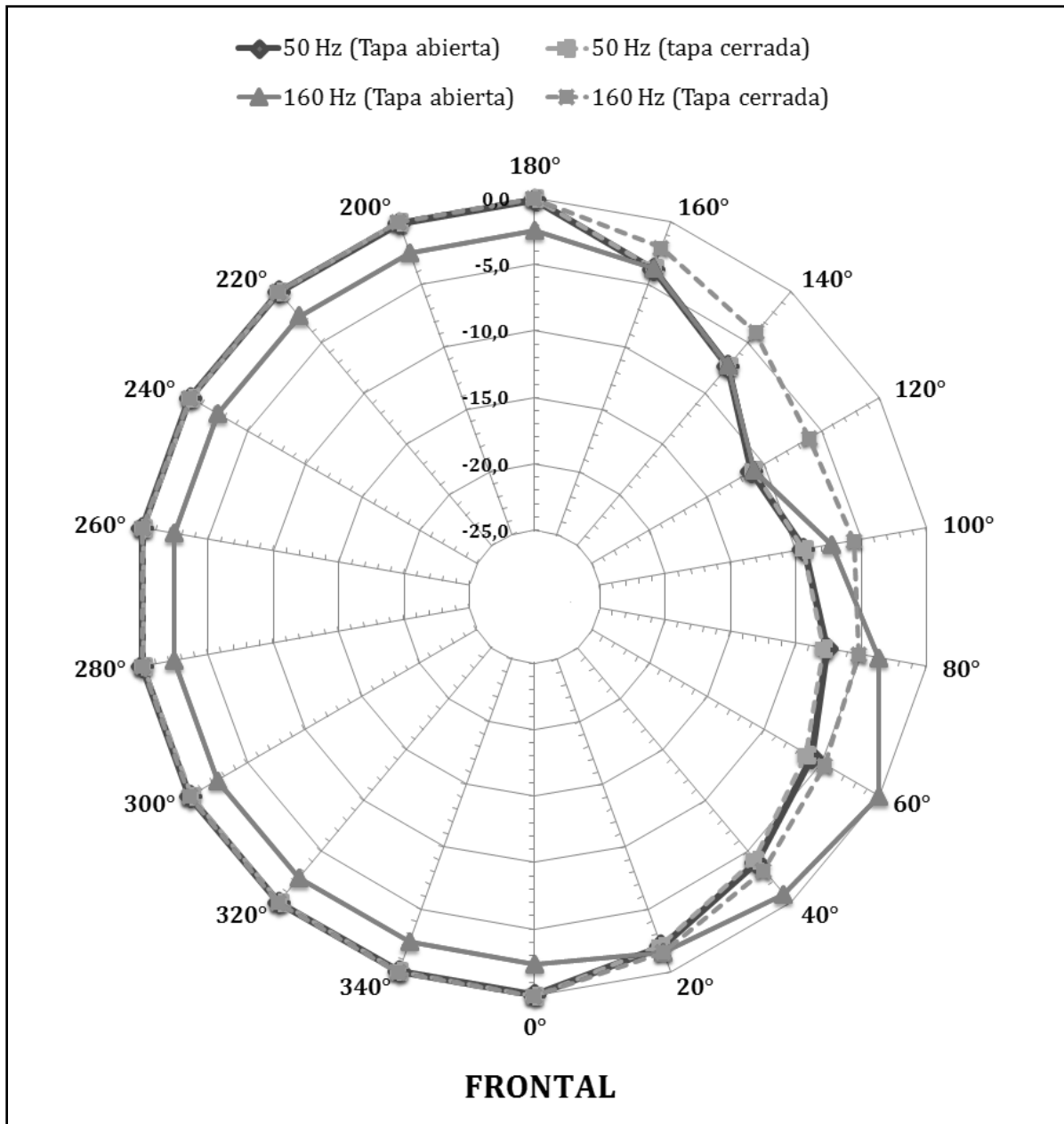
Niveles sonoros [dBr]							
Frecuencia (Banda en 1/3 de octava)	Tapa	Posición					
		0°	60°	120°	180°	240°	300°
50 Hz	Abierta	- 0,1	- 5,9	- 11,1	- 0,1	0,0	0,0
	Cerrada	0,0	- 6,3	- 10,9	0,0	0,0	- 0,1
160 Hz	Abierta	- 2,4	0,0	- 10,9	- 2,4	- 2,4	- 2,4
	Cerrada	0,0	- 4,7	- 6,0	0,0	0,0	0,0

**Tabla 3.48.** Niveles sonoros [dBr] de las bandas de frecuencias de 50 Hz y 160 Hz (en tercios de octavas) para las distintas posiciones y en condiciones de tapa abierta y cerrada.

A muy bajas frecuencias, por ejemplo en la banda de frecuencias de 50 Hz, los resultados obtenidos de las medidas realizadas con tapa abierta y tapa cerrada son muy similares. Los mayores niveles sonoros se concentran preferentemente en la parte posterior del piano de cola.

En la banda de frecuencias de 160 Hz, la diferencia de nivel entre el punto de máxima radiación y el de mínima es de 10,9 dB en condiciones de tapa abierta, reduciéndose esta a 6 dB cuando la tapa se encuentra cerrada. Al igual que sucedía en la banda de frecuencias de 50 Hz, cuando el mueble del piano está tapado la emisión sonora presenta valores más elevados en la parte posterior del instrumento. Sin embargo, en posición de tapa abierta, los mayores niveles sonoros se focalizan alrededor del ángulo de 60°.

A la hora de elaborar el diagrama polar de directividad mostrado en la siguiente **figura 3.131** se han tomado en consideración los niveles sonoros recogidos en la **tabla 3.48** para las 6 posiciones de medida existentes (0°, 60°, 120°, 180°, 240° y 300°). Se han creado puntos intermedios (20°, 40°, 80°, 100°, 140°, 160°, 200°, 220°, 260°, 280°, 320° y 340°) para optimizar la visualización del diagrama. Los valores asignados a esos puntos se han calculado suponiendo que la caída de los niveles sonoros entre las 6 posiciones de medida sucede de forma regular. Esto también se aplica al resto de diagramas polares recogidos en los sucesivos apartados.



**Figura 3.131.** Diagrama polar de la radiación sonora del piano a las bandas de 50 Hz y 160 Hz (1/3 oct.) en condiciones de tapa abierta y cerrada.

#### 4.9.3.2. Registro medio

En la siguiente **tabla 3.49** se especifican las muestras sonoras usadas en el estudio de las características direccionales del piano para frecuencias medias.

Muestras sonoras empleadas en el estudio de la directividad (registro medio)				
Fragmento	Frecuencias	Tapa	Posición	Pistas CD audio
Fragmento 8	Fa#2 – Mi 5 (92,5 Hz – 659,3 Hz)	Abierta	0°	105
			60°	106
			120°	107
			180°	108
			240°	109
			300°	110
		Cerrada	0°	111
			60°	112
			120°	113
			180°	114
			240°	115
			300°	116

Tabla 3.49. Registros sonoros utilizados para el estudio de la directividad del piano en el registro medio.

#### 4.9.3.2.1. Tapa abierta

En la **figura 3.132** se presenta una comparación de las formas de onda del fragmento musical en estudio en cada una de las posiciones de medida en condiciones de tapa abierta.

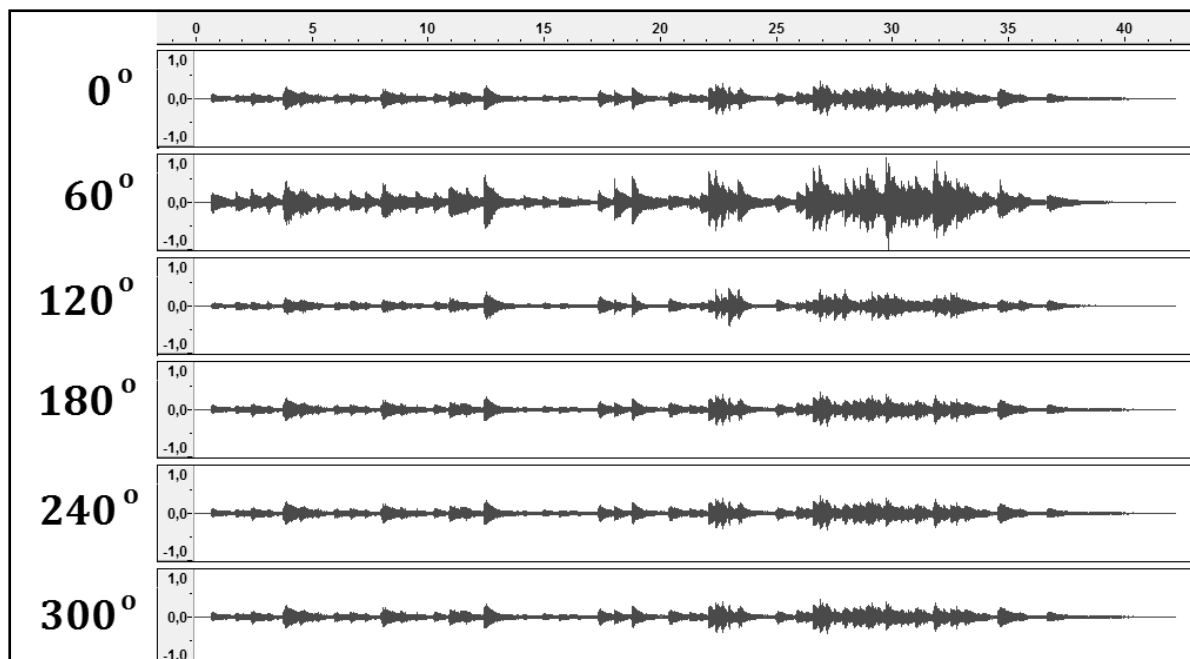


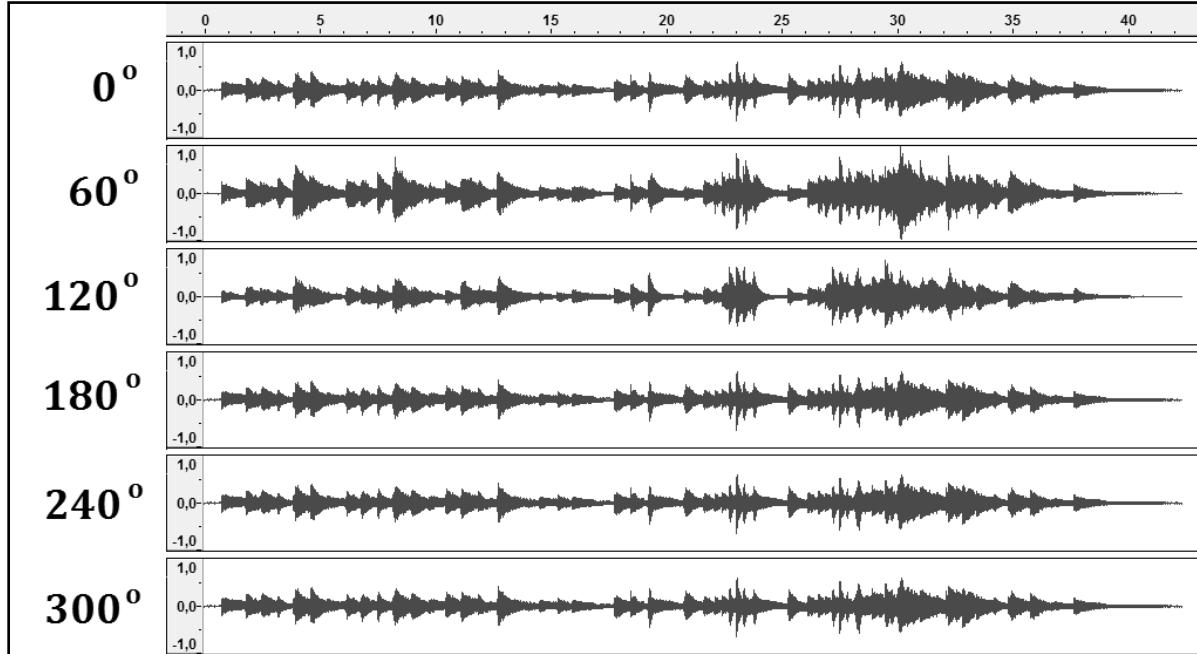
Figura 3.132. Formas de onda de los registros sonoros correspondientes al Fragmento 8 en condiciones de tapa abierta.

Se observa una focalización notoria de la energía sonora alrededor del ángulo horizontal de 60°.



#### 4.9.3.2.2. Tapa cerrada

A continuación se representan las formas de onda del mismo fragmento musical esta vez en condiciones de tapa cerrada.



**Figura 3.133.** Formas de onda de los registros sonoros correspondientes al Fragmento 8 en condiciones de tapa cerrada.

Al igual que sucedía en el fragmento grave, cuando la tapa superior del piano se encuentra cerrada no existe tanta diferencia entre los niveles sonoros alcanzados en cada una de los distintos puntos de medida.

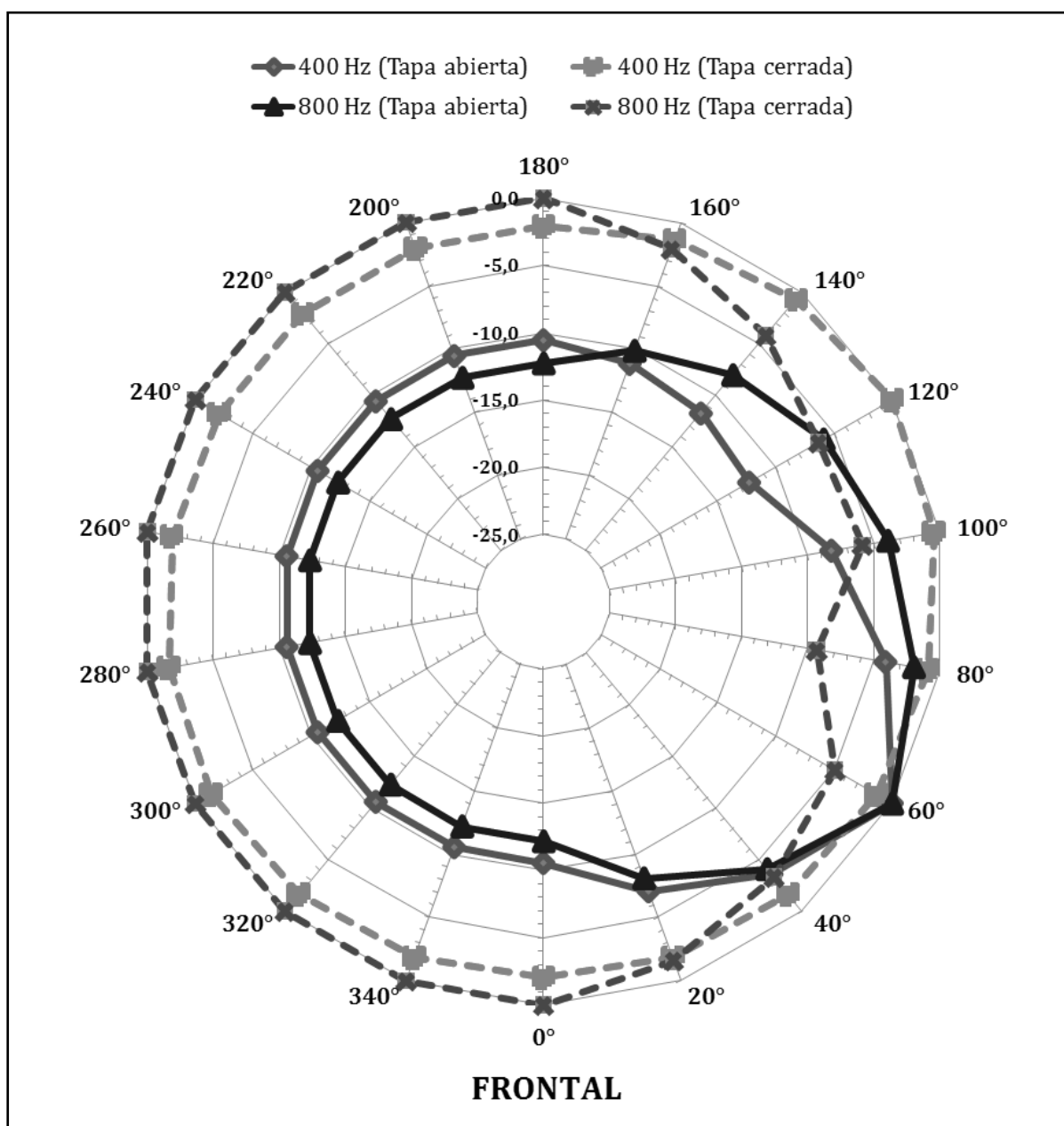
#### 4.9.3.2.3. Comparación entre tapa abierta y cerrada

El nivel máximo de intensidad sonora del Fragmento 8 tocado con la tapa superior cerrada es 5,3 dB menor que el perteneciente a la interpretación con tapa en posición abierta.

En la siguiente **tabla 3.50** y **figura 3.134** se muestran los resultados obtenidos a las bandas de 1/3 de octavas con frecuencias centrales en 400 Hz y 800 Hz. Se recuerda que se emplean valores relativos tanto en condiciones de tapa abierta como cerrada, asignándole al mayor nivel sonoro medido el valor de 0,0 dB.

Niveles sonoros [dBr]							
Frecuencia (Banda en 1/3 de octava)	Tapa	Posición					
		0°	60°	120°	180°	240°	300°
400 Hz	Abierta	-10,6	0,0	-12,3	-10,6	-10,6	-10,6
	Cerrada	-2,1	-1,4	0,0	-2,1	-2,1	-1,4
800 Hz	Abierta	-12,3	0,0	-5,9	-12,3	-12,3	-12,3
	Cerrada	0,0	-4,9	-6,3	0,0	0,0	0,0

**Tabla 3.50.** Niveles sonoros [dBr] de las bandas de frecuencias de 400 Hz y 800 Hz (en tercios de octavas) para las distintas posiciones y en condiciones de tapa abierta y cerrada.



**Figura 3.134.** Diagrama polar de la radiación sonora del piano a las bandas de 400 Hz y 800 Hz (1/3 oct.) en condiciones de tapa abierta y cerrada.

Tanto en la banda de frecuencias de 400 Hz como en la de 800 Hz los resultados alcanzados con la tapa cerrada difieren sustancialmente a los obtenidos con la tapa abierta. Cuando esta presenta un ángulo de apertura los mayores niveles sonoros se localizan alrededor del ángulo de 60° para una y otra banda de frecuencia.

La diferencia de nivel entre el punto de máxima radiación y el de mínima en condiciones de tapa abierta es de 12,3 dB en ambas bandas de frecuencias. Cuando el mueble del instrumento está cerrado la diferencia disminuye hasta los 2,1 dB para la banda de 400 Hz y los 6,3 dB en el caso de la banda de 800 Hz.

### 4.9.3.3. Registro agudo

Finalmente, en la siguiente tabla se reflejan los registros sonoros utilizados en la caracterización de la directividad del piano para frecuencias agudas.

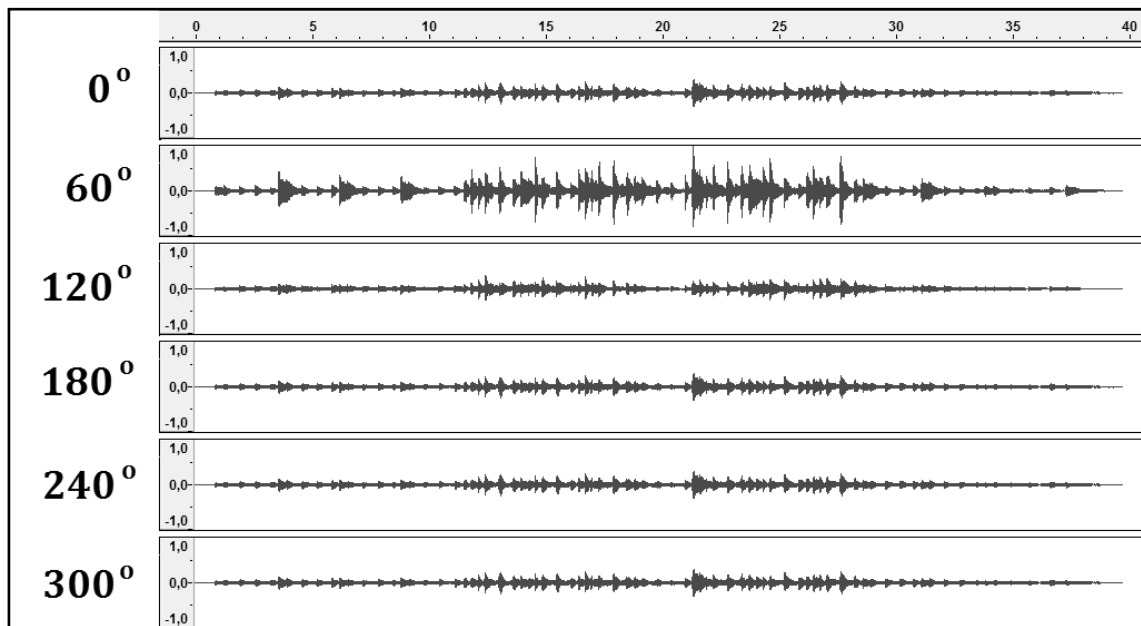
Muestras sonoras empleadas en el estudio de la directividad (registro agudo)				
Fragmento	Frecuencias	Tapa	Posición	Pistas CD audio
Fragmento 9	Sol#4 - Si6 (415,3 Hz - 1.975,5 Hz)	Abierta	0°	117
			60°	118
			120°	119
			180°	120
			240°	121
			300°	122
		Cerrada	0°	123
			60°	124
			120°	125
			180°	126
			240°	127
			300°	128

**Tabla 3.51.** Registros sonoros utilizados para el estudio de la directividad del piano en el registro agudo.

#### 4.9.3.3.1. Tapa abierta

A continuación se muestra una comparación de las formas de onda del fragmento musical en estudio en cada una de las posiciones de medida en condiciones de tapa abierta.

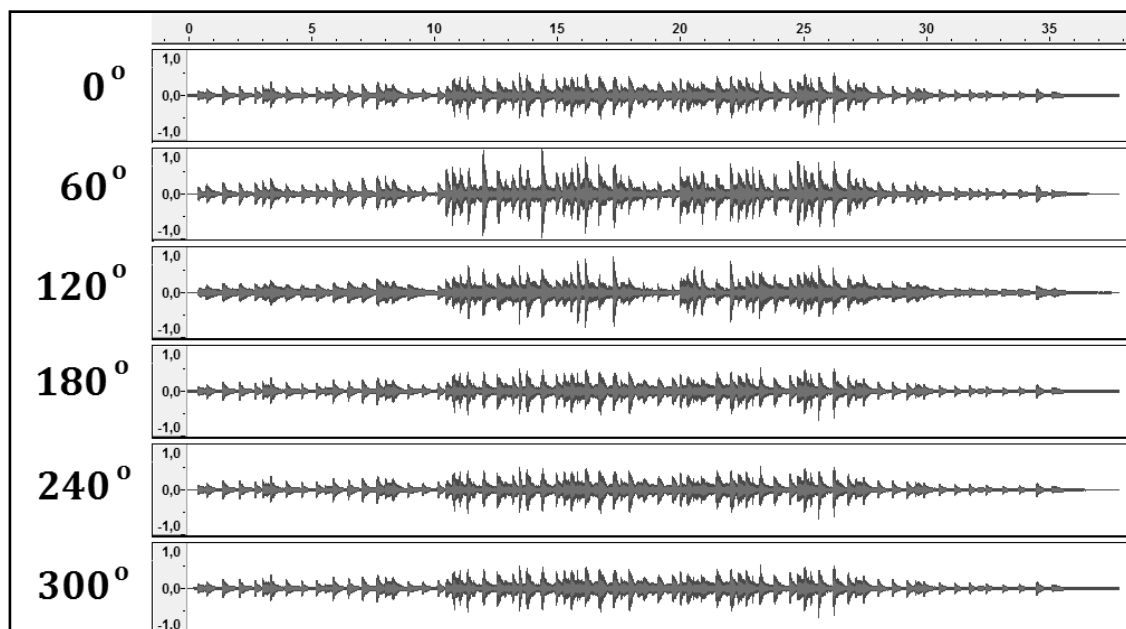
Tal y como sucede en el registro grave y medio del instrumento, en la anterior figura se aprecia una indudable focalización de la energía sonora alrededor del ángulo horizontal de 60°.



**Figura 3.135.** Formas de onda de los registros sonoros correspondientes al Fragmento 9 en condiciones de tapa abierta.

#### 4.9.3.3.2. Tapa cerrada

En la **figura 3.136** se visualizan las formas de onda del mismo fragmento musical en condiciones de tapa cerrada.



**Figura 3.136.** Formas de onda de los registros sonoros correspondientes al Fragmento 9 en condiciones de tapa cerrada.

Al igual que sucedía en el fragmento grave y medio, cuando la tapa superior del instrumento permanece cerrada no se observa tanta diferencia entre los niveles sonoros alcanzados en cada una de los distintos puntos de medida.

#### 4.9.3.3.3. Comparación entre tapa abierta y cerrada

El nivel máximo de intensidad sonora del Fragmento 8 tocado con la tapa superior cerrada es 6,7 dB menor que el perteneciente a la interpretación con tapa en posición abierta.

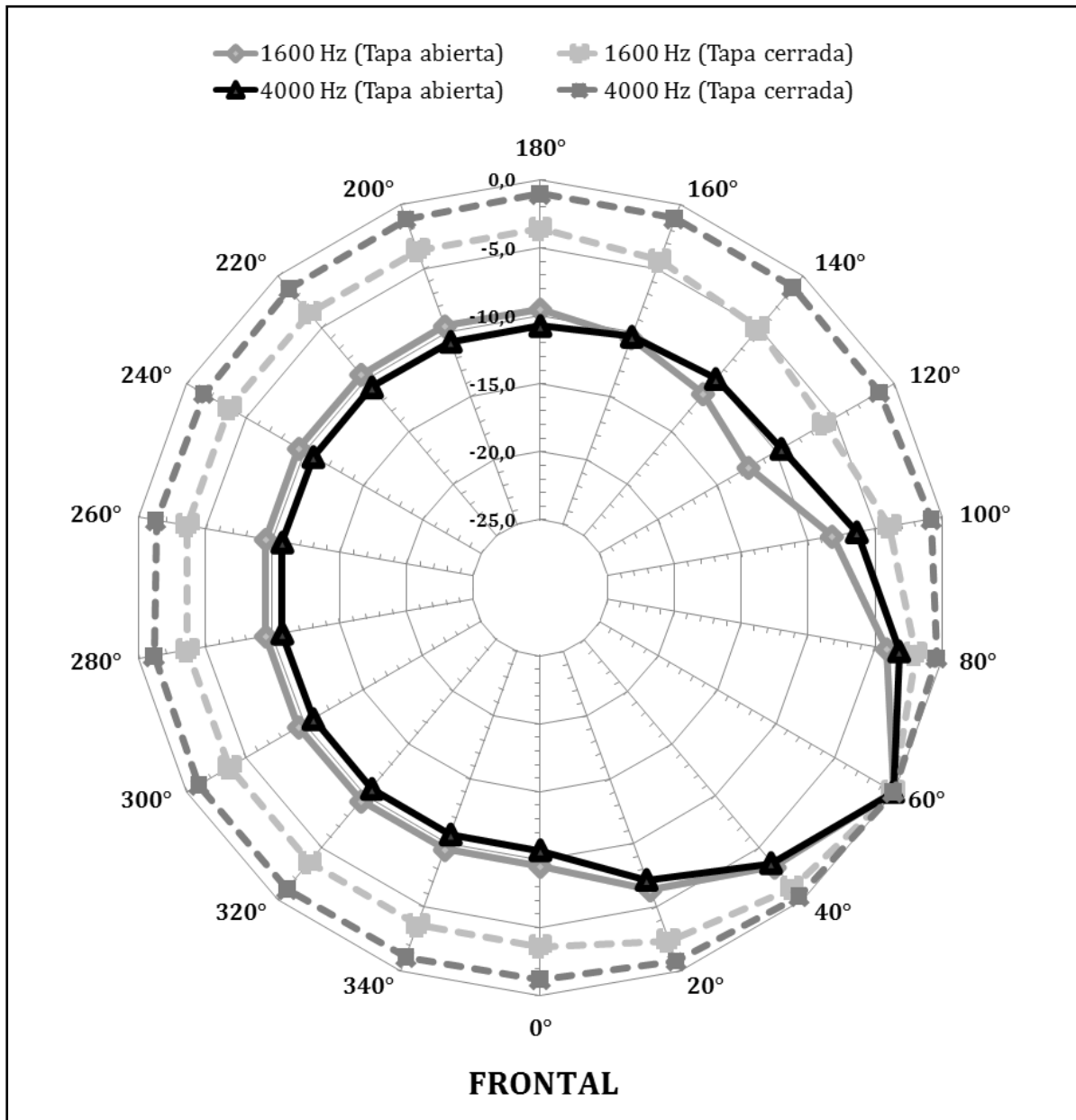
En la siguiente **tabla 3.52** y **figura 3.137** se exponen los resultados obtenidos a las bandas de 1/3 de octavas con frecuencias centrales en 1.600 Hz y 4.000 Hz. Se recuerda que se utilizan valores relativos tanto en condiciones de tapa abierta como cerrada, asignándole al mayor nivel sonoro medido el valor de 0,0 dB.

Niveles sonoros [dBr]							
Frecuencia (Banda en 1/3 de octava)	Tapa	Posición					
		0°	60°	120°	180°	240°	300°
1.600 Hz	Abierta	-9,5	<b>0,0</b>	-12,3	-9,5	-9,5	-9,5
	Cerrada	-3,6	<b>0,0</b>	-5,9	-3,6	-3,6	-3,6
4.000 Hz	Abierta	-10,7	<b>0,0</b>	-9,5	-10,7	-10,7	-10,7
	Cerrada	-1,2	<b>0,0</b>	-1,2	-1,0	-1,0	-1,4

**Tabla 3.52.** Niveles sonoros [dBr] de las bandas de frecuencias de 1.600 Hz y 4.000 Hz (en tercios de octavas) para las distintas posiciones y en condiciones de tapa abierta y cerrada.

Al igual que ocurre en las bandas de frecuencias del registro medio del instrumento, los resultados obtenidos con la tapa cerrada son notoriamente diferentes a los alcanzados con cuando está se encuentra cerrada. No obstante, a altas frecuencias los mayores niveles sonoros, en ambas condiciones de apertura, se localizan cercanas al ángulo de 60°.

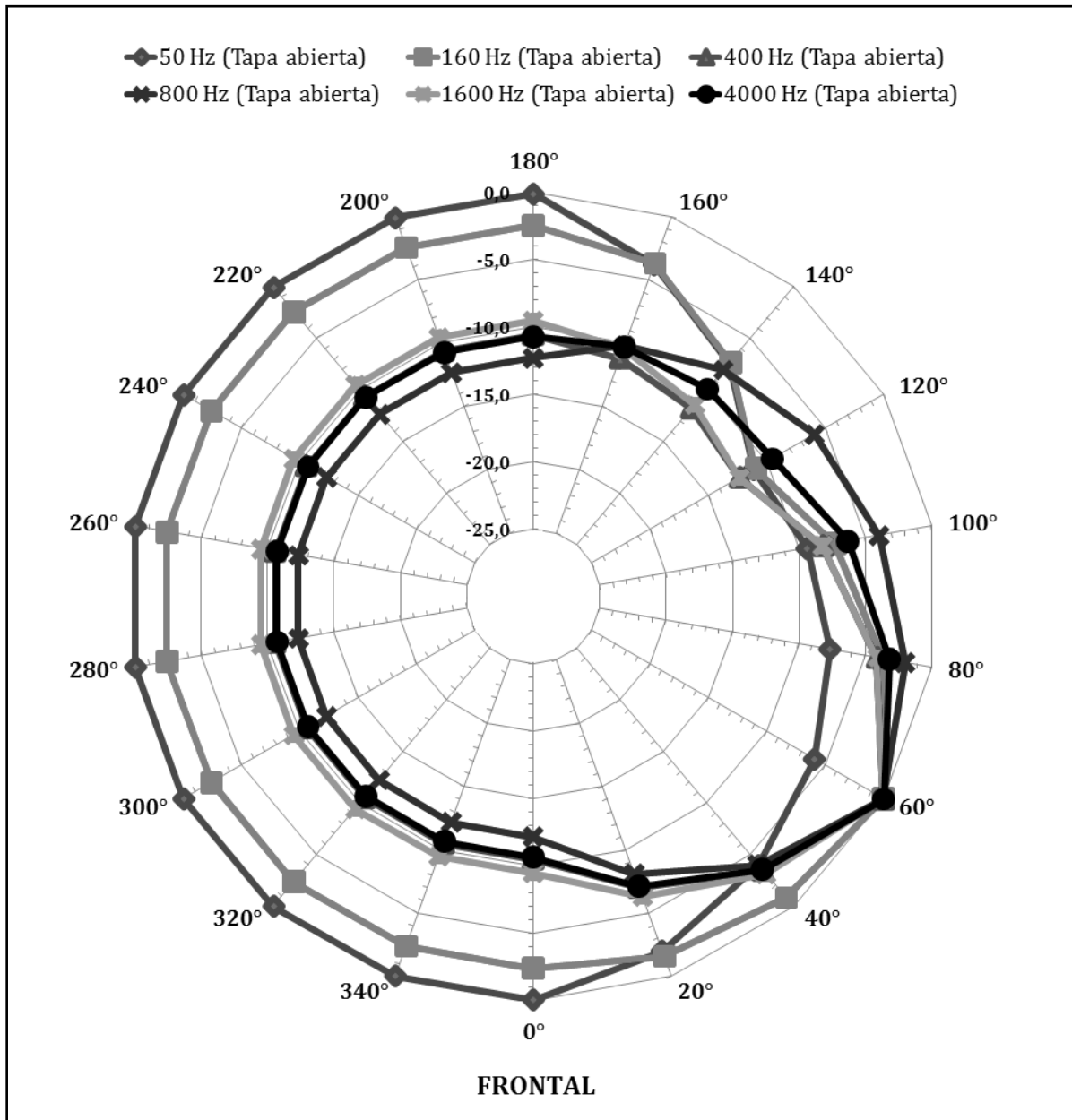
La diferencia de nivel entre el punto de máxima radiación y el de mínima en condiciones de tapa abierta es de 12,3 dB para la banda de 1,6 KHz y de 10,7 dB para la de 4 KHz. Cuando el mueble del instrumento está cerrado la diferencia mengua hasta los 5,9 dB para la banda de 1,6 KHz y los 1,4 dB en el caso de la banda de 4 KHz.



**Figura 3.137.** Diagrama polar de la radiación sonora del piano a las bandas de 1600 Hz y 4000 Hz (1/3 oct.) en condiciones de tapa abierta y cerrada.

#### 4.9.4. Discusión de los resultados

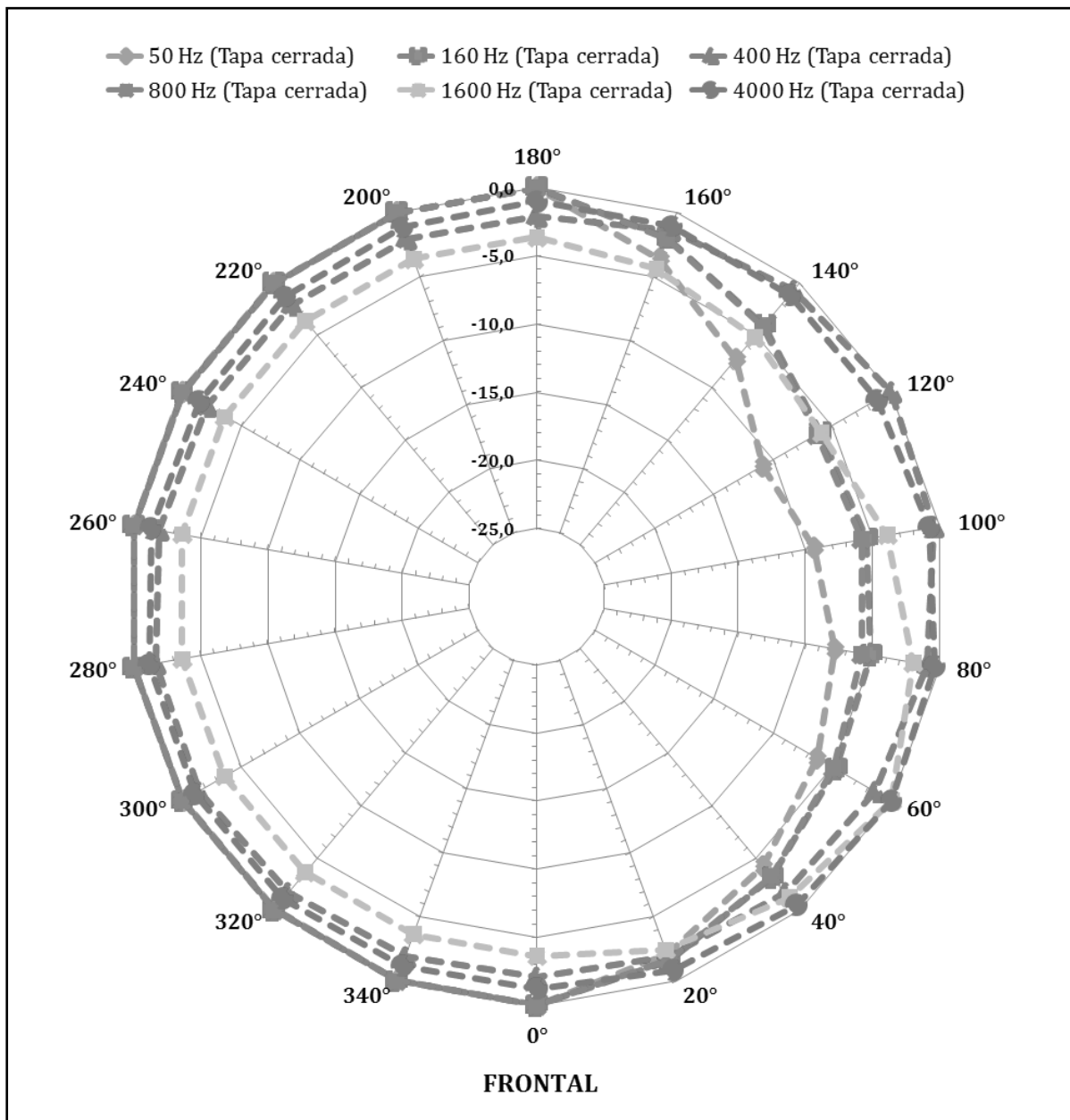
En la siguiente figura se representa un diagrama polar donde se comparan las características de la radiación sonora del piano de cola a las 6 bandas de frecuencias anteriormente estudiadas (50 Hz, 160 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1,6 KHz y 4 KHz) en condiciones de tapa abierta.



**Figura 3.138.** Diagrama polar de la radiación sonora del piano de las distintas bandas de frecuencias (1/3 oct.) estudiadas en condiciones de tapa abierta.

Se observa como a medida que aumenta la frecuencia de la emisión sonora esta se hace más direccional, concentrándose la energía alrededor del ángulo de 60°.

A continuación, en la **figura 3.139** se muestra la comparativa de los distintos niveles sonoros obtenidos para las bandas de frecuencias de 50 Hz, 160 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1,6 KHz y 4 KHz en condiciones de tapa cerrada.



**Figura 3.139.** Diagrama polar de la radiación sonora del piano de las distintas bandas de frecuencias (1/3 oct.) estudiadas en condiciones de tapa cerrada.

Cuando el mueble del instrumento se encuentra cerrado se aprecia, en líneas generales, una mayor uniformidad en la distribución de la energía sonora alrededor del instrumento independientemente de la frecuencia de la radiación sonora.



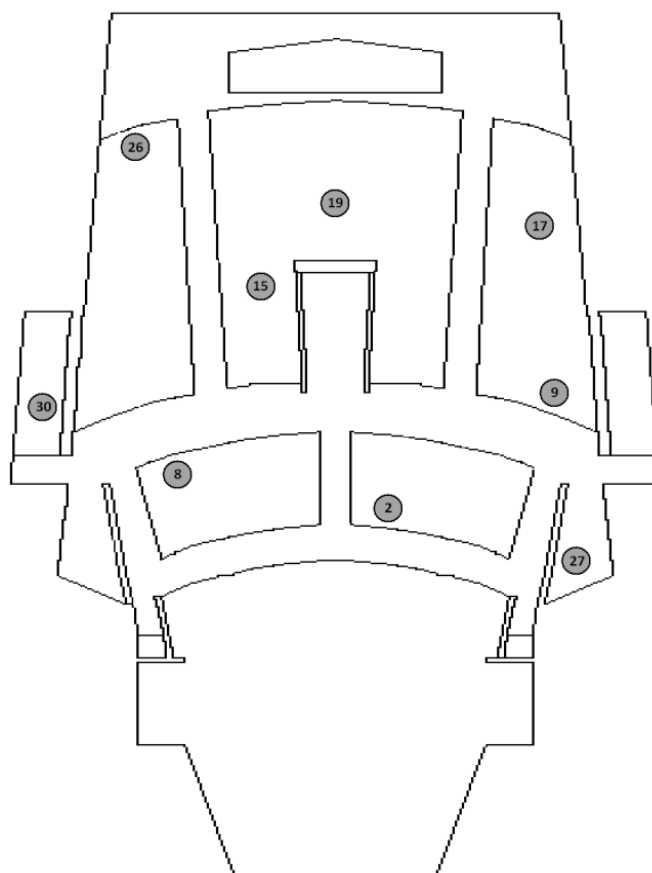
## Capítulo 4: Conclusiones y líneas futuras de investigación

### 4.1. Conclusiones

#### PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA

Para elaborar una valoración global de las condiciones acústicas del Auditorio se han tenido en cuenta las evaluaciones de los distintos parámetros llevadas a cabo en el Capítulo 3 de la presente Memoria. En las siguientes **tablas 4.1** y **4.2** se recopilan sintetizados los resultados correspondientes a las posiciones de medida 2, 8, 9, 15, 17, 19, 26, 27 y 30 (**figura 4.1**).

En el caso de los parámetros que se definen en función de la frecuencia el criterio seguido para la designación de una única valoración subjetiva (mala, pobre, regular, buena o excelente) se ha basado en la realización de un promedio de las valoraciones de todas las bandas de frecuencias analizadas.



**Figura 4.1.** Situación de las nueve posiciones de medida seleccionadas.

Posición	C <sub>50</sub>	C <sub>80</sub>		%ALCons		RASTI		D <sub>50</sub>
	EASE	DIRAC	EASE	DIRAC	EASE	DIRAC	EASE	DIRAC
2	Excelente	Buena	Excelente	Pobre	Excelente	Regular	Excelente	Pobre
8	Regular	Buena	Excelente	Pobre	Bueno	Regular	Bueno	Pobre
9	Mala	Regular	Regular	Pobre	Bueno	Regular	Bueno	Pobre
15	Pobre	Pobre	Buena	Pobre	Bueno	Regular	Bueno	Mala
17	Mala	Regular	Regular	Pobre	Bueno	Regular	Bueno	Mala
19	Pobre	Mala	Buena	Pobre	Bueno	Regular	Bueno	Mala
26	Pobre	Mala	Regular	Pobre	Regular	Regular	Regular	Mala
27	Mala	Excelente	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Pobre
30	Mala	Pobre	Regular	Pobre	Regular	Regular	Regular	Mala

**Tabla 4.1.** Resumen de la Claridad de la voz (C<sub>50</sub>), Claridad musical (C<sub>80</sub>), %ALCons, RASTI y la Definición (D<sub>50</sub>) de la sala.

Posición	SPL <sub>D</sub>	SPL <sub>R</sub>	D/R Ratio	D <sub>C</sub>	First arrival	Reflectograma (Ecos)
	EASE					
2	91 – 94 dB	93 – 99 dB	SPL <sub>D</sub> > SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> = SPL <sub>R</sub>	18 ms	Eco no molesto
8	83 – 89 dB	88 – 98 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	31 ms	Eco no molesto
9	79 – 87 dB	86 – 97 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	41 ms	Eco no molesto
15	83 – 87 dB	88 – 97 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	39 ms	Eco no molesto
17	81 – 84 dB	87 – 97 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	61 ms	Eco no molesto
19	83 – 85 dB	87 – 97 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	61 ms	Eco no molesto
26	80 – 87 dB	87 – 97 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	74 ms	Eco no molesto
27	75 – 89 dB	86 – 98 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	27 ms	Eco molesto
30	77 – 88 dB	86 – 97 dB	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	SPL <sub>D</sub> < SPL <sub>R</sub>	46 ms	Eco molesto

**Tabla 4.2.** Resumen del Nivel Directo, Nivel Total, D/R Ratio, Distancia crítica, First arrival y Reflectogramas de la sala.

Tras haber resumido las valoraciones y resultados de los distintos parámetros en las tablas anteriores, se procede a investigar cuáles son las posiciones de medida que disfrutan de mejores condiciones acústicas. Para ello se han seguido los siguientes criterios:

- **C<sub>50</sub>, C<sub>80</sub>, %ALCons, RASTI y D<sub>50</sub>.** Se puntúan las valoraciones del 1 al 5, siendo: 1=Malo y 5=Excelente.
- **Reflectogramas.** Se puntúan con un 0 los ecos molestos y con un 5 los no molestos.
- **D/R Ratio** y, en consecuencia, a la **Distancia crítica**. Teniendo en cuenta que es preferible que el nivel directo supere al reverberante en un determinado punto de la

sala, se ha valorado esta condición con un 5, con un 0 la situación inversa y con un 2,5 el hecho de que el nivel directo sea igual al reverberante.

- **Resto de parámetros.** Los demás parámetros presentes en la **tabla 4.2** ( $SPL_D$ ,  $SPL_R$  y First arrival) no se han incluido en esta valoración final ya que no existe un criterio específico con el que juzgar los valores obtenidos y poder afirmar en base a ellos si existen o no unas buenas condiciones acústicas en los puntos de medida.


Finalmente se sumaron todas las puntuaciones obtenidas en cada parámetro para cada una de las posiciones (**tabla 4.3**). Para la claridad musical ( $C_{80}$ ) y los parámetros de inteligibilidad %ALCons y RASTI se dispone de dos opciones de resultados: los brindados por Dirac y la medida *in situ* de la respuesta de la sala y los proporcionados por la simulación en EASE. Con el fin de que ambos tengan cabida en la evaluación final, se han realizado dos sumas de puntuaciones:

- **Opción a):** resultados aportados por Dirac ( $C_{80}$ , %ALCons, RASTI y  $D_{50}$ ).
- **Opción b):** datos provenientes de EASE ( $C_{50}$ ,  $C_{80}$ , %ALCons, RASTI, Ecos, D/R Ratio y  $D_c$ ).

Posición	$C_{50}$	$C_{80}$		%ALCons		RASTI		$D_{50}$	Ecos	D/R Ratio	$D_c$	TOTAL puntuaciones	
	EASE	a) Dirac	b) EASE	a) Dirac	b) EASE	a) Dirac	b) EASE	Dirac	EASE			a) Dirac	b) EASE
<b>2</b>	5	4	5	2	5	3	5	2	5	5	2,5	<b>11</b>	<b>32,5</b>
<b>8</b>	3	4	5	2	4	3	4	2	5	0	0	<b>11</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	1	3	3	2	4	3	4	2	5	0	0	<b>10</b>	<b>17</b>
<b>15</b>	2	2	4	2	4	3	4	1	5	0	0	<b>8</b>	<b>19</b>
<b>17</b>	1	3	3	2	4	3	4	1	5	0	0	<b>9</b>	<b>17</b>
<b>19</b>	2	1	4	2	4	3	4	1	5	0	0	<b>7</b>	<b>19</b>
<b>26</b>	2	1	3	2	4	3	3	1	5	0	0	<b>7</b>	<b>17</b>
<b>27</b>	1	5	3	3	4	3	3	2	0	0	0	<b>13</b>	<b>11</b>
<b>30</b>	1	2	3	2	4	3	3	1	0	0	0	<b>8</b>	<b>11</b>

**Tabla 4.3.** Tablas de puntuaciones de las posiciones de medida.

En la siguiente **tabla 4.4** se presentan las nueve posiciones en estudio ordenadas según la calidad de sus condiciones acústicas. Se reflejan en ella las dos condiciones de medida existentes: sala vacía (se dispone de los datos de 4 parámetros proporcionados por Dirac) y sala llena (valores de 7 parámetros brindados por EASE). A la hora de realizar un promedio entre ambas, se priorizan los resultados facilitados por la simulación ya que el mayor número de parámetros analizados en ella asegura una mejor caracterización acústica del recinto. En el resultado global se presuponen unas condiciones de sala medio llena, que suele ser la ocupación más habitual.

	Dirac	EASE	Resultado global
	Sala vacía	Sala ocupada	
<b>Mejor posición</b>    <b>Peor posición</b>	27	2	2
	2 = 8	8	8
		15 = 19	15
	9	9 = 17 = 26	9
	17		19
	15 = 30	9 = 17 = 26	17
			27
	19 = 26	27 = 30	26
			30

**Tabla 4.4.** Posiciones de medida ordenadas de mejor a peor valoración en Dirac, EASE y en promedio.

Se observa que, a grandes rasgos, Dirac prioriza la cercanía de las posiciones a la fuente sonora antes que su situación respecto al eje de máxima radiación, mientras que EASE brinda mejores resultados atendiendo primero a la directividad y, después, a la cercanía al escenario.

Las mejores posiciones, promediando los resultados obtenidos en la medida *in situ* realizada con Dirac con los de la simulación en EASE, corresponden a los puntos de medida 2 y 8. Estas posiciones son las más próximas al escenario. El punto de escucha 8 se encuentra algo alejado del eje de máxima radiación pero, aún así, predomina su cercanía frente a esta desviación.

Además de las mencionadas posiciones 2 y 8, destacan en las primeras posiciones los puntos de medida: 27 y 9 en Dirac y 15 y 19 en EASE. En Dirac, este orden viene determinado por la cercanía a la fuente sonora, ya que la posición 27 corresponde al palco de platea y la posición 9 está situada en la primera fila del anfiteatro. En cambio, en EASE prevalece el efecto de la directividad, valorándose con mejor calidad acústica las posiciones 15 y 19 en detrimento

de otras más próximas al escenario como son la 27 y la 9. La posición 15 se encuentra muy cercana al eje de máxima radiación sonora de la fuente y la 19 coincide con dicho eje.

En un siguiente nivel de idoneidad se encuentran los lugares de escucha 17, 15 y 30 según los resultados ofrecidos por Dirac y 9, 17 y 26 según los de EASE. La posición 17 obtiene valoraciones acústicas semejantes tanto en Dirac como en EASE, debido a que este punto de medida se sitúa en un punto intermedio respecto a la distancia a la fuente sonora así como a la desviación del eje de máxima radiación.

Finalmente, las peores posiciones acústicamente hablando son la 19 y 26 bajo el criterio de Dirac, y la 27 y 30 en el caso de EASE. Promediando ambas opciones la posición con menor puntuación a nivel acústico es la número 30, situada en los palcos laterales. Estos, además de estar alejados del eje de máxima radiación, no se localizan integrados con el resto de las áreas de audiencia, sino que están literalmente empotrados a una altura considerable en las paredes laterales del recinto. Este particular emplazamiento provoca que el sonido que se dirige hacia esa dirección choque con dichas paredes y, por tanto, únicamente una parte del mismo acceda por la abertura que comunica el palco con el volumen total de la sala.

Como conclusión, se aconseja a la hora de elegir una ubicación para disfrutar de un evento en esta sala que preferentemente esta se encuentre situada lo más próxima posible a las posiciones de medida 2, 8, 15 o 9. Esto garantizará una calidad acústica satisfactoria. El hecho de destacar estos cuatro puntos de escucha como los más positivos no implica que las demás posiciones del recinto no sean aptas para un buen disfrute de la música puesto que, en general, la sala goza de unas aceptables condiciones acústicas en todas sus zonas de audiencia. Únicamente en los palcos los resultados de algunos parámetros sonoros suscitan dudas acerca de si la escucha en ellos puede llegar a ser del todo placentera.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de elegir un emplazamiento donde sentarse es el visual. Aunque la determinación de la posición más idónea atendiendo a parámetros no acústicos no sea objeto de este estudio, es cierto que a la hora de decidir esta posición se suele sopesar que tanto la visión como la escucha resulten satisfactorias. Por ello, tras haberse aportado los datos acústicos que caracterizan este Auditorio, queda en manos del espectador la elección del lugar donde ubicarse.

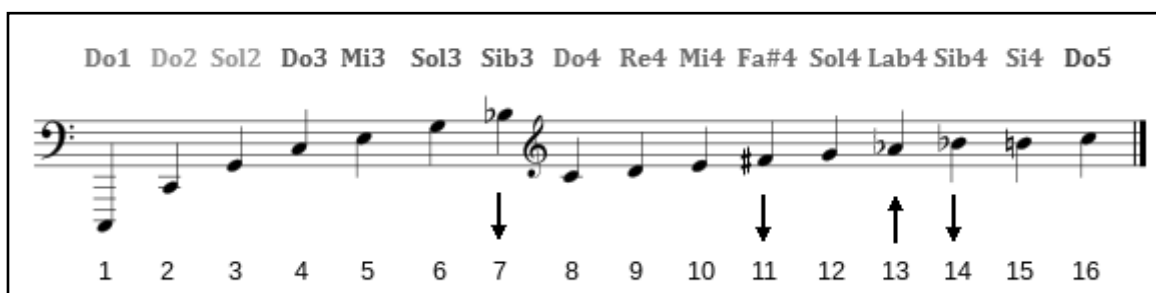


**Figura 4.3.** Vista del escenario desde el palco lateral (posición 30).

**PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA**

El piano es un instrumento de cuerda percutida que genera su sonido mediante el golpeo de sus cuerdas mediante martillos asociados a teclas que son accionadas por el intérprete.

Las cuerdas que alberga en el interior de su mueble están tensas sujetas por sus dos extremos. En estas condiciones, al excitar una cuerda esta vibrará a una frecuencia periódica denominada fundamental y, además, a una serie de frecuencias superiores denominadas armónicos hasta que la energía que los hace ascender a lo largo de la serie disminuye y queda reducida a cantidades despreciables. Estos sonidos de resonancia superior que acompañan a un sonido fundamental ( $f_1$ ) se organizan mediante la siguiente expresión:  $f_n = n f_1$  siendo  $n = 1, 2, \dots, n$ ; formando lo que se conoce como serie armónica (**figura 4.4**).

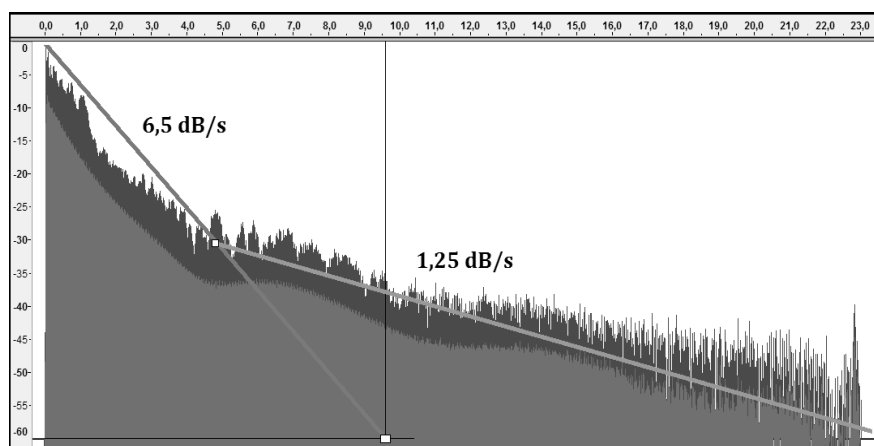


**Figura 4.4.** Serie armónica: 16 primeros armónicos de la frecuencia fundamental Do1.

Lo habitual es que los primeros armónicos (especialmente el fundamental) de una serie tengan una mayor amplitud y contengan más energía respecto a los de menor índice, y que esta disminuya progresivamente a lo largo de la serie armónica. Sin embargo, existen excepciones localizadas en las notas de bajas frecuencias. Al analizar los sonidos más graves del instrumento se observa que el armónico de mayor nivel no es el fundamental, siendo en algunos casos el segundo, y en otros el tercero. A pesar de ello, el oído humano percibe la altura correcta del sonido gracias a que reconstruye la frecuencia fundamental de este a partir del resto de armónicos, siempre que estos estén correctamente afinados. Por otra parte, se aprecia como a medida que las alturas fundamentales son más graves si se comparan dos armónicos consecutivos el segundo de ellos no siempre tiene una menor amplitud sonora que el primero.

Si se examina la evolución temporal de la amplitud de las notas que puede producir el piano a lo largo de la extensión de su registro (considerando que se mantiene pulsada la tecla hasta que el sonido se extinga) se observa que generalmente existen dos fases en la caída del sonido (**figura 4.5**). La primera de ellas, la del sonido inmediato, tiene poca duración y una la tasa de atenuación elevada. La segunda constituye la resonancia, un período más largo con una

atenuación del nivel de presión acústica más progresiva. Este particular comportamiento del sonido del piano tiene su origen fundamentalmente en la utilización de dobles y triples cuerdas, aunque también influye la existencia de dos direcciones de vibración o polarizaciones en cada una de ellas.



**Figura 4.5.** Efecto de la doble caída de la envolvente de la nota Do2. Pendiente de caída del sonido inmediato (*trazo rojo*). Pendiente de caída del sonido de resonancia (*trazo verde*).

La pendiente de caída del sonido inmediato se hace más pronunciada conforme se asciende por la tesitura del instrumento, oscilando entre los 4,5 y 70 dB/s dependiendo de la frecuencia de la nota en cuestión. La tasa de caída del sonido de resonancia también aumenta con la frecuencia aunque de manera más lenta. En las notas más agudas del instrumento se igualan ambas tasas constituyendo una única pendiente de caída.

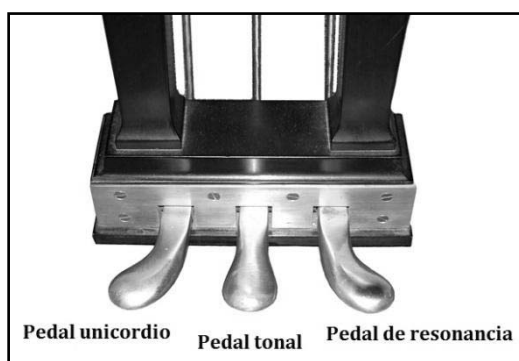
El efecto de la doble caída de las envolventes es más notorio en el registro medio del instrumento donde se localizan las mayores diferencias entre las tasas de caída del sonido inmediato y del sonido de resonancia.

A la hora de abordar la ejecución pianística el intérprete alterna sonidos “suaves” con sonidos “fuertes”, es decir, hace uso de la dinámica. En términos mecánicos, la dinámica se corresponde con la fuerza de pulsación de las teclas y, por tanto, con la velocidad que adquiere el martillo en su viaje desde su posición de reposo hasta que golpea las cuerdas. Mientras mayor es la velocidad, la compresión del fieltro del martillo es más firme y el tiempo de contacto entre este y las cuerdas menor. Teniendo en cuenta que la amortiguación que sufre la vibración de las cuerdas disminuye cuanto más breve sea el tiempo de contacto, esto provoca que los sonidos tocados en *ff* dispongan de un mayor número de parciales superiores en comparación con los interpretados en *pp*.



A medida que el sonido es más agudo, la caída del nivel de sus armónicos ocurre más rápidamente. Esto sucede en todo el rango de dinámicas pero resulta especialmente patente en los sonidos “más suaves”. Independientemente de la frecuencia de la altura fundamental los niveles sonoros de los armónicos de las notas interpretadas en dinámica “suave” caen más rápidamente que los de las alturas tocadas en dinámica “fuerte”. Es decir, la diferencia entre los niveles sonoros en *ff* y *pp* para un mismo armónico no se mantiene constante a lo largo del espectro frecuencial del sonido, aumentando conforme se asciende por la serie armónica.

El timbre y la intensidad de la radiación sonora del instrumento también se pueden modificar mediante el accionamiento de los pedales. Los pianos de cola disponen de tres: el pedal izquierdo, unicordio o *una corda*, el central o tonal y el derecho o de resonancia (**figura 4.6**).



**Figura 4.6.** Pedales de un piano de cola.

Al pisar el pedal derecho se elevan los apagadores de todas las cuerdas del instrumento permitiendo así la vibración libre de estas mientras este se mantenga pulsado. El accionamiento de este pedal conlleva un incremento del tiempo de caída de las notas afectadas, un aumento de la contribución energética de las mismas y una modificación del timbre resultante debido a la adición de componentes frecuenciales pertenecientes a las vibraciones del resto de cuerdas que oscilan por simpatía a través del aire y de los puentes tonales al estar los apagadores de todas las notas del piano levantados. El incremento de la energía sonora generada es mayor cuando las notas interpretadas con el pedal derecho pulsado pertenecen al registro grave del instrumento, ya que estas excitan con más facilidad a las demás cuerdas.

El análisis del espectrograma de una nota tocada mientras el pedal de resonancia se encuentra accionado, muestra una mayor intensidad sonora en sus armónicos y una mayor cantidad de energía sonora presente en las diferentes zonas situadas entre dichos armónicos, especialmente en los primeros momentos del evento sonoro, así como en frecuencias inferiores al armónico fundamental de la misma.

El uso de este pedal en un fragmento musical provoca la superposición de los distintos sonidos que lo conforman ya que las notas se mantienen más tiempo sonando aunque las teclas hayan dejado de estar pulsadas. El pianista deberá controlar su efecto de diversas maneras: pisándolo a fondo o no, renovándolo con mayor o menor frecuencia, variando la velocidad de su accionamiento, etc.

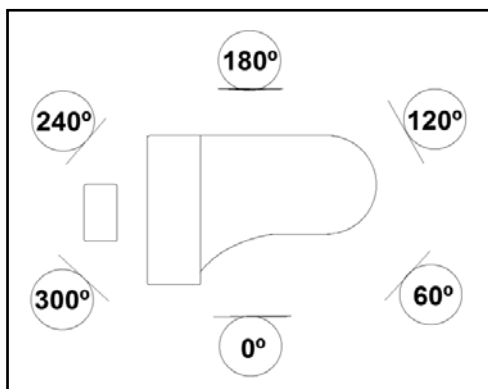
Por su parte, el pedal izquierdo del piano de cola desplaza lateralmente todos los martillos para que estos percutan una cantidad de cuerdas menor de lo habitual. En el caso de las notas que poseen tres cuerdas, los martillos golpean sobre dos de ellas; cuando las notas tienen dos cuerdas, estos percuten una sola y cuando son cuerdas individuales los martillos inciden en ellas con el borde del fieltro. Las cuerdas no percutidas de la nota empezarán a vibrar en oposición de fase debido a la transmisión a través del puente.

El accionamiento del pedal unicordio genera una disminución de la contribución energética total de las notas afectadas. El perfil de las envolventes de dichas notas también sufre modificaciones, sobre todo en el registro medio del instrumento, en donde se observa una atenuación del efecto de la doble caída. Esto se traduce en una transformación del timbre del sonido emitido debido a la diferencia de fase en la vibración de las cuerdas y al aumento de la proporción de la resonancia con respecto al sonido inmediato.

El pedal central del piano de cola conserva en vibración ciertas notas mediante la elevación de sus correspondientes apagadores, logrando así un efecto de nota pedal. Esto se consigue pulsando las notas cuyos sonidos se desean mantener y, antes de levantar los dedos de las teclas, pisando el pedal. Mientras este se mantenga accionado estas seguirán sonando, a pesar de que las teclas ya se hayan elevado, hasta que la vibración se extinga por sí misma. El hecho que diferencia este pedal del de resonancia es que no afecta a las notas que se toquen después de que este haya sido pisado. De esta manera, el sonido de la primera altura musical permanecerá hasta la extinción de la vibración por sí misma (sin la influencia de los apagadores), mientras que el de la segunda solo se mantendrá el tiempo que esté bajada su tecla.

El efecto del pedal central se percibe mejor si las notas que se desean mantener sonando están situadas en el registro grave o medio del instrumento ya que estas contienen mayores niveles de energía y su sonido permanecerá más tiempo y a intensidades superiores en comparación con las notas agudas. Si las alturas que se quieren conservar vibrando pertenecen al registro agudo del piano estas podrán ser enmascaradas con mayor facilidad por los sonidos que tengan lugar posteriormente.

Finalmente, hay que tener en cuenta que la emisión sonora del piano de cola no es completamente uniforme alrededor del mismo. Las propiedades direccionales de este instrumento son resultado de la interacción entre los patrones de radiación de su tabla armónica y el ángulo de apertura de su tapa superior. Esta última puede colocarse en varias posiciones, siendo las más usuales: tapa abierta y tapa cerrada (**figura 4.8**).



**Figura 4.7.** Posiciones de medida de la directividad del instrumento en el plano horizontal.



**Figura 4.8.** Posiciones de la tapa del piano de cola.

En condiciones de tapa abierta, se observa como a medida que aumenta la frecuencia de la emisión sonora esta se hace más directiva, concentrándose la energía alrededor del ángulo de 60° (**figura 4.7**). Sin embargo, cuando el mueble del instrumento se encuentra cerrado se aprecia, en líneas generales, una mayor uniformidad en la distribución de la energía sonora alrededor del instrumento independientemente de la frecuencia de la radiación sonora. Para radiaciones de muy bajas frecuencias, la tapa apenas ejerce influencia ya que las longitudes de onda de estas frecuencias son suficientemente largas para rodear la tapa, obteniéndose diagramas polares muy similares en condiciones de tapa abierta y cerrada.

## 4.2. Líneas futuras de investigación

### PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA

- Diseñar una propuesta de mejora del acondicionamiento acústico del Auditorio del CPMLPGC/CSMC.
- Analizar el sistema de refuerzo sonoro presente en el recinto.
- Elaborar una propuesta de mejora del sistema de refuerzo sonoro si se considera necesario tras el estudio del mismo.

### PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA

- Ahondar en la caracterización acústica del piano de cola considerando otros aspectos como, por ejemplo, la vibración de las cuerdas por simpatía y la influencia de las diferentes articulaciones con las que se pueden interpretar las notas en el instrumento (*legato, staccato, tenuto, marcato*, etc.).
- Ampliar el estudio a otros tipos de piano, preferentemente el piano de media cola y el vertical, para conocer las particularidades acústicas de cada uno de ellos y poder compararlas con las del piano de gran cola.

### PARTES A Y B

- Realizar la auralización del Auditorio del CPMLPGC/CSMC empleando las muestras sonoras grabadas del piano de cola.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Raya, R. (2009). *Estudio acústico del Conservatorio de Las Palmas y diseño de la Sala de Banda*. Proyecto Fin de Carrera. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de G. C.
- [2] Burred, J. (1999). *La Acústica del Piano*. Madrid: Conservatorio Profesional de Música Arturo Soria de Madrid.
- [3] Mora, J. (2012). *Caracterización acústica del piano de cola*. Trabajo Final de Grado. Gandía: Escuela Politécnica Superior de Gandía.
- [4] Martin, D. W. (1947). Decay rates of piano tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19 (4).
- [5] Suzuki, H. (2007). Spectrum analysis and tone quality evaluation of piano tones with hard and soft touches. *Acoustical Science and Technology*, 28 (1), pp. 1-6.
- [6] Lehtonen, H., Penttinen, H., Rauhala, J. y Välimäki, V. (2007). Analysis and modeling of piano sustain-pedal effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122 (3), pp. 1787-1797.
- [7] Lehtonen, H., Askenfelt, A. y Välimäki, V. (2009). Analysis of the part-pedaling effect in the piano. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126 (2), pp. 49-54.
- [8] Weinreich, G. (1977). Coupled piano strings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62 (6), pp. 1474-1484.
- [9] Askenfelt, A. y Jansson, E. (1987). *From touch to string vibrations*. Recuperado de: [https://www.speech.kth.se/music/5\\_lectures/askenflt/askenflt.html](https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/askenflt/askenflt.html)
- [10] Wogram, K. (1988). *The strings and the soundboard*. Recuperado de: [https://www.speech.kth.se/music/5\\_lectures/wogram/index.html#top](https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/wogram/index.html#top)
- [11] Hirschhorn, M. (2004). *Dynamic Model of a Piano Action Mechanism*. Waterloo, Canadá: University of Waterloo.

- [12] Santiago, G. (2009). *Estudio de toma microfónica de instrumentos de cuerda y viento y realización de una guía didáctica multimedia*. Proyecto Fin de Carrera. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de G. C.
- [13] Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- [14] Merino, J. (2006). *Las vibraciones de la música*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- [15] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S (2011). *Product Data. DIRAC Room Acoustics Software – Type 7841*. Recuperado de:  
<http://www.bruel.hu/pdf/bp1974dirac.pdf>
- [16] Basilio, J. E. (2003). *Experiencias de laboratorio para estudiantes de Ingeniería acústica: altavoces planos de modos distribuidos*. Recuperado de:  
<http://www.epsevg.upc.edu/xic/ponencias/R0179.pdf>
- [17] Ahnert Feistel Media Group (2009). *EASE 4.3 User's Guide & Tutorial*. Recuperado de:  
[http://www.afmgsupport.eu/SoftwareDownloadBase/EASE/EASE\\_4.3\\_Tutorial\\_English.pdf](http://www.afmgsupport.eu/SoftwareDownloadBase/EASE/EASE_4.3_Tutorial_English.pdf)
- [18] Pérez, D. (2012). *Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*. Proyecto Fin de Carrera. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- [19] Digidesing (2008). *Guía de referencia Pro Tools 8.0*. Recuperado de:  
[http://akmedia.digidesign.com/support/docs/PT\\_Reference\\_Guide\\_80es\\_62441.pdf](http://akmedia.digidesign.com/support/docs/PT_Reference_Guide_80es_62441.pdf)
- [20] Sony Creative Software Inc. (2013). *User Manual Sound Forge™ 11*. Recuperado de:  
[http://dspcdn.sonycreativesoftware.com/manuals/soundforgepro11.0.272\\_manual\\_enu.pdf](http://dspcdn.sonycreativesoftware.com/manuals/soundforgepro11.0.272_manual_enu.pdf)
- [21] AudacityTeam (2015). *Funciones de Audacity*. Recuperado de:  
<http://web.audacityteam.org/about/features>
- [22] Adobe Systems Inc. (2014). *Adobe Audition CC Help*. Recuperado de:  
[https://helpx.adobe.com/es/pdf/audition\\_reference.pdf](https://helpx.adobe.com/es/pdf/audition_reference.pdf)
- [23] Virtins Technology (2014). *Virtins Multi-Instrument 3.4 Manual*. Recuperado de:  
<http://www.virtins.com/Multi-Instrument-Manual.pdf>

- [24] Millán, J. M. (2012). *Instalaciones de megafonía y sonorización*. Madrid: Editorial Paraninfo.
- [25] Fletcher, H., Blackham, E. y Stratton, R. (1962). Quality of piano tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34 (6), pp. 749-761.
- [26] Connect For Education, Inc. (2015). *OnMusic Dictionary*. Recuperado de:  
<http://dictionary.onmusic.org/>
- [27] Weinreich, G. (1979). Vibraciones acopladas de las cuerdas del piano. *Investigación y ciencia*, 30. Barcelona: Prensa Científica.
- [28] Fletcher, N. y Rossing, T. (1998). *The Physics of Musical Instruments*. Nueva York: Springer.
- [29] Senior, M. (2008). *Piano Recording. The SOS Guide to capturing a great acoustic piano sound*. Recuperado de:  
[http://www.soundonsound.com/sos/jan08/articles/pianorecording\\_0108.htm](http://www.soundonsound.com/sos/jan08/articles/pianorecording_0108.htm)
- [30] De la Torre, F. (2011). Evolución. Más allá de la física: el camino del sonido. *Contact Center* [en línea], 55, pp. 94-96. Recuperado de:  
[http://www.contactcenter.es/revistas/55/CC55\\_Web\\_94-96.pdf](http://www.contactcenter.es/revistas/55/CC55_Web_94-96.pdf)
- [31] Miyara, F. (1999). *Control de ruido*. Recuperado de:  
[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208031/ENTRENAMIENTO\\_AUDITIVO -  
AVA/DOCUMENTOS DE APOYO/Miyara F . 1999 . Control de ruido.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208031/ENTRENAMIENTO_AUDITIVO_-_AVA/DOCUMENTOS_DE_APOYO/Miyara_F_.1999_.Control_de_ruido.pdf)
- [32] Plata, Á. (6 de diciembre de 2013). *Física del sonido*. Recuperado de:  
<http://www.alessanfate.com/2013/12/la-fisica-del-sonido.html>
- [33] Schnitzler, S. (2013). *Curso de sonido*. Recuperado de:  
<http://www.yio.com.ar/contenido.php?artid=5>
- [34] Martín, D. (2014). *Apuntes de acústica*. Recuperado de:  
<http://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf>
- [35] ZyTrax, Inc. (2014). *Tech Stuff. Acoustic Calculators*. Recuperado de:  
<http://www.zytrax.com/tech/audio/calculator.html#centers>

- [36] Acoustic Engineering (2002). *Technical Note. Impulse response to noise ratio*. Recuperado de: <http://acoustics-engineering.com/files/TN007.pdf>
- [37] Odeon A/S (2013). *Odeon v. 12 User Manual*. Recuperado de: <http://www.odeon.dk/pdf/ODEONManual12.pdf>
- [38] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S (2011). *Application Note. Measuring Speech Intelligibility using Dirac Type 7841*. Recuperado de: <http://www.bksv.com/doc/bo0521.pdf>
- [39] Wikipedia Contributors (1 de mayo, 2015). *Hornbostel-Sachs*. Recuperado de: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hornbostel%E2%80%93Sachs&oldid=660186245>
- [40] Landolfi, H. (2015). *Historia del piano*. Recuperado de: [https://www.academia.edu/11588572/Historia\\_del\\_piano](https://www.academia.edu/11588572/Historia_del_piano)
- [41] Puig, J. (2010). *Artículos técnicos. Historia del piano*. Recuperado de: <http://www.pianospuig.com/ca/piano/historia/historia.html>
- [42] Department of Physics of the Duke University (2013). *Cristofori Action*. Recuperado de: <http://www.phy.duke.edu/~dtl/136126/restrict/after/14/piano/animchr.html>
- [43] Leonhardt, T. (s.f.). *The Fortepiano*. Recuperado de: [http://www.lvbeethoven.com/VotreLVB/English\\_Trudelies.html](http://www.lvbeethoven.com/VotreLVB/English_Trudelies.html)
- [44] Cole, M. (2015). *Square pianos*. Recuperado de: <http://squarepianos.com/square.html>
- [45] Entre88teclas (s.f.). *Historia y evolución del piano*. Recuperado de: <http://www.entre88teclas.es/el-piano-historia-del-instrumento>
- [46] Steinway & Sons (2014). *Piano de cola D-274*. Recuperado de: <http://eu.steinway.com/es/pianos/steinway/pianos-de-cola/d-274/>
- [47] Cassarani, J. A. (s.f.). *Información técnica del piano*. Recuperado de: <http://www.cassapiano.com.ar/infotecnica.html>
- [48] Smit, C. (2004). *The Construction of the Piano*. Recuperado de: <http://www.piano.christophersmit.com/playingMech.html>



- [49] Kaplan, K. (2010). *Acoustic analysis of a grand piano's strings and soundboards*. Recuperado de:  
[http://www.geometer.co/documents/FinalReport\\_PHYS225\\_PianoAnalysis.doc](http://www.geometer.co/documents/FinalReport_PHYS225_PianoAnalysis.doc)
- [50] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación (2014). *Organización del libre ejercicio*. Recuperado de: [http://www.coitt.es/res/libredocs/OLEA%202014\\_v1.pdf](http://www.coitt.es/res/libredocs/OLEA%202014_v1.pdf)



# ANEXOS

---



# Anexos I: Fundamentación teórica

---

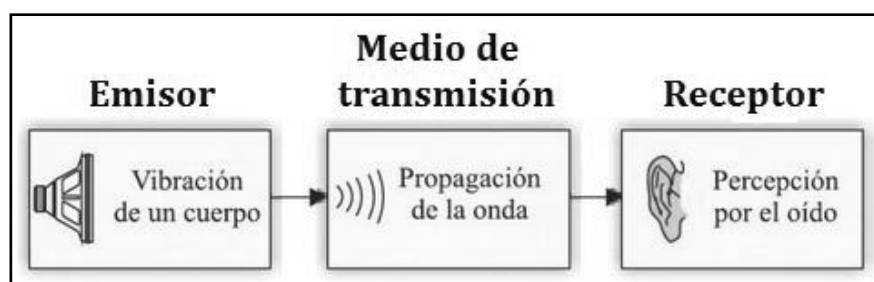
## I.A. EL SONIDO

### 1. Definición

El vocablo ‘sonido’ se emplea de dos maneras distintas y complementarias. Por un lado, los fisiólogos lo definen en término de “las sensaciones auditivas producidas por perturbaciones longitudinales en el aire” [De la Torre]. Sin embargo, en física, se entiende el sonido como “las perturbaciones en sí mismas, no como las sensaciones que producen” [30]. Más concretamente, se denomina sonido a la onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) y que es capaz de producir una sensación auditiva. El sonido no es capaz de transmitirse en el vacío debido a la inexistencia de partículas que pudiesen entrar en vibración para propagar la onda [13].

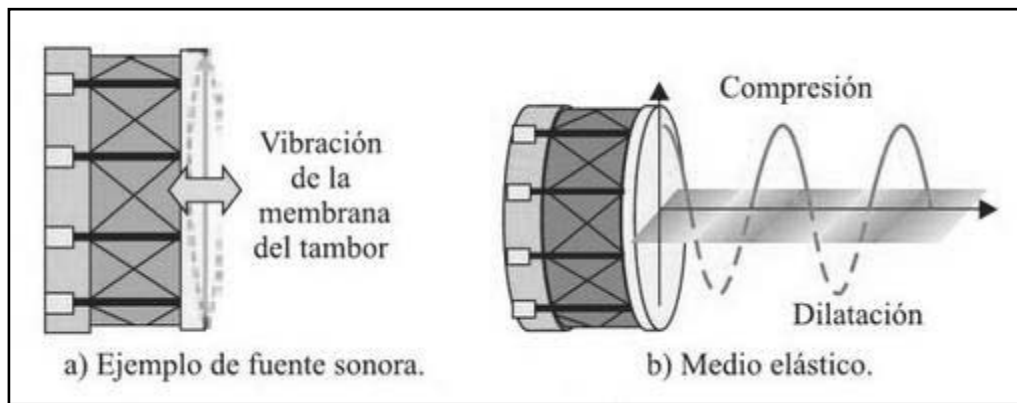
### 2. Generación y transmisión del sonido. Fenómeno físico

En el fenómeno físico de la generación y transmisión del sonido intervienen tres elementos: el emisor (vibración de un cuerpo), el medio de transmisión (propagación de la onda) y el receptor (percepción por el oído), tal y como muestra la siguiente figura [24].



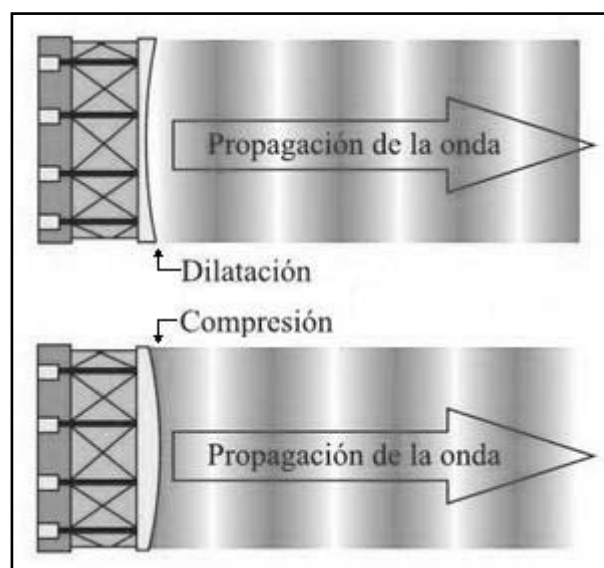
**Figura I.A.1.** Diagrama de bloques de la generación, transmisión y recepción del sonido [24].

Al emisor se le denomina fuente sonora y genera sonido cuando entra en vibración. Considerando en este caso que es el aire el medio de propagación del sonido, la vibración del cuerpo se transmite a las partículas de aire adyacentes a la fuente sonora y estas, a su vez, las transmiten a nuevas moléculas contiguas [13]. Durante este proceso las partículas no se desplazan sino que oscilan alrededor de su posición de equilibrio poniendo también en movimiento oscilatorio a las circundantes creando así ‘un efecto dominó’ a lo largo del recorrido de propagación de la onda.



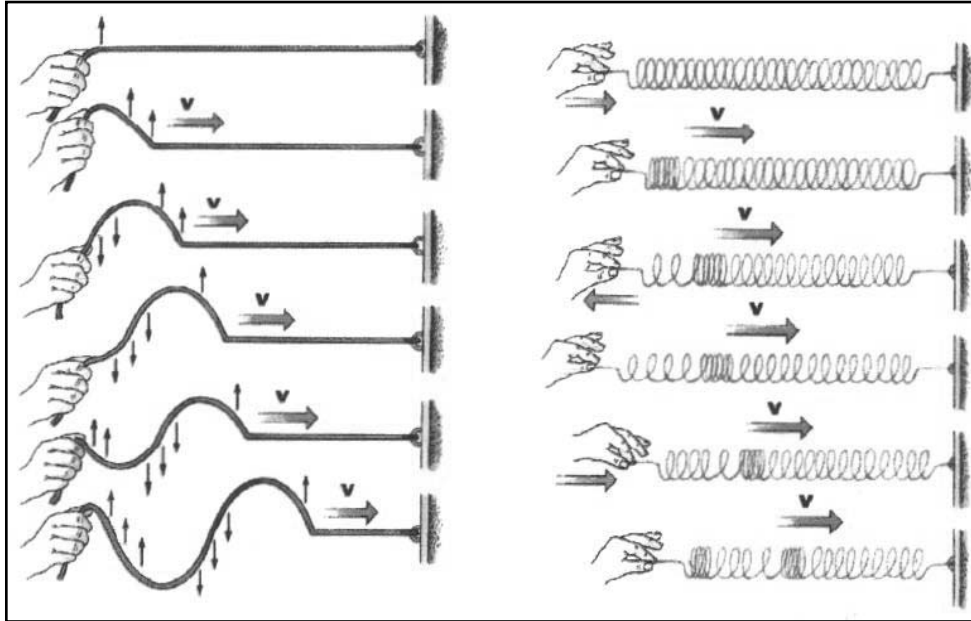
**Figura I.A.2.** Ejemplo de generación y transmisión del sonido [24].

En la anterior **figura I.A.2** se muestra la generación de sonido producida por un tambor. La membrana del instrumento entra en vibración tras ser excitada mediante un golpe. La oscilación de la membrana pone en movimiento el aire que la rodea, comprimiéndolo y descomprimiéndolo periódicamente. Cuando la membrana se desplaza hacia afuera, las partículas de aire próximas a su superficie se acumulan creándose una zona de compresión. En cambio, cuando el movimiento de esta es hacia dentro, dichas partículas se separan dando lugar a una zona de dilatación o descompresión (**figura I.A.3**) [24].



**Figura I.A.3.** Propagación del sonido [Millán].

En el caso de las ondas sonoras las moléculas desplazadas van empujando a las contiguas en la misma dirección que la de propagación de la onda. Por ello estas se consideran ondas longitudinales en contraposición a las electromagnéticas que son transversales (oscilación de la señal generadora perpendicular a la dirección de propagación de la onda) [14].



**Figura I.A.4.** Ondas transversales (izquierda) y ondas longitudinales (derecha) [14].

En resumen, las **ondas acústicas o sonoras** constituyen un tipo de ondas mecánicas y longitudinales de frecuencia contenida en un rango aproximado de los 20 Hz a los 20 KHz que tienen la virtud de estimular el oído humano y generar la sensación sonora. Son ondas esféricas, perturbaciones de presión que producidas en un punto de un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso, generalmente el aire) no quedan localizadas en ese punto sino que se propagan en todas las direcciones a través de dicho medio mediante la compresión y expansión del mismo.

### 3. Clasificación de los sonidos

Los sonidos se dividen en deterministas o periódicos y aleatorios o no periódicos. “Los primeros se pueden representar siempre mediante una expresión matemática que indica la forma en que varía la correspondiente presión sonora en función del tiempo. Los segundos, en cambio, van asociados a vibraciones irregulares que nunca se repiten exactamente y que, por tanto, solamente se pueden describir mediante parámetros estadísticos” [13].

#### 3.1. Sonidos periódicos o armónicos

##### 3.1.1. Sonido periódico simple (tono puro)

Es el tipo de sonido más simple existente en la naturaleza, ya que se compone una única frecuencia ( $f_1$ ) constante [13]. La presión sonora varía en posición y tiempo de manera senoidal [24], pudiéndose expresar matemáticamente mediante la siguiente ecuación. Un ejemplo de sonido periódico simple es el producido por un diapasón.

$$x(t) = A \cdot \text{Sen}(wt - \varphi)$$

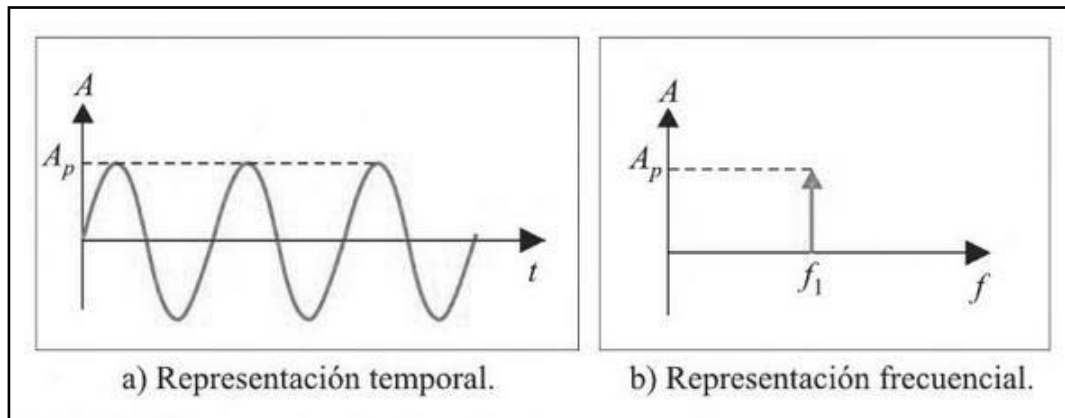


Figura I.A.5. Representación temporal y frecuencial de un sonido periódico simple o tono puro [24].

### 3.1.2. Sonido periódico complejo o armónico

Está caracterizado por una frecuencia fundamental o primer armónico y un conjunto finito (y a veces infinito) de frecuencias múltiplos de esta, denominados armónicos. Por regla general, la frecuencia fundamental es la que lleva asociada más potencia sonora [13]. La mayoría de los instrumentos musicales genera este tipo de sonido.

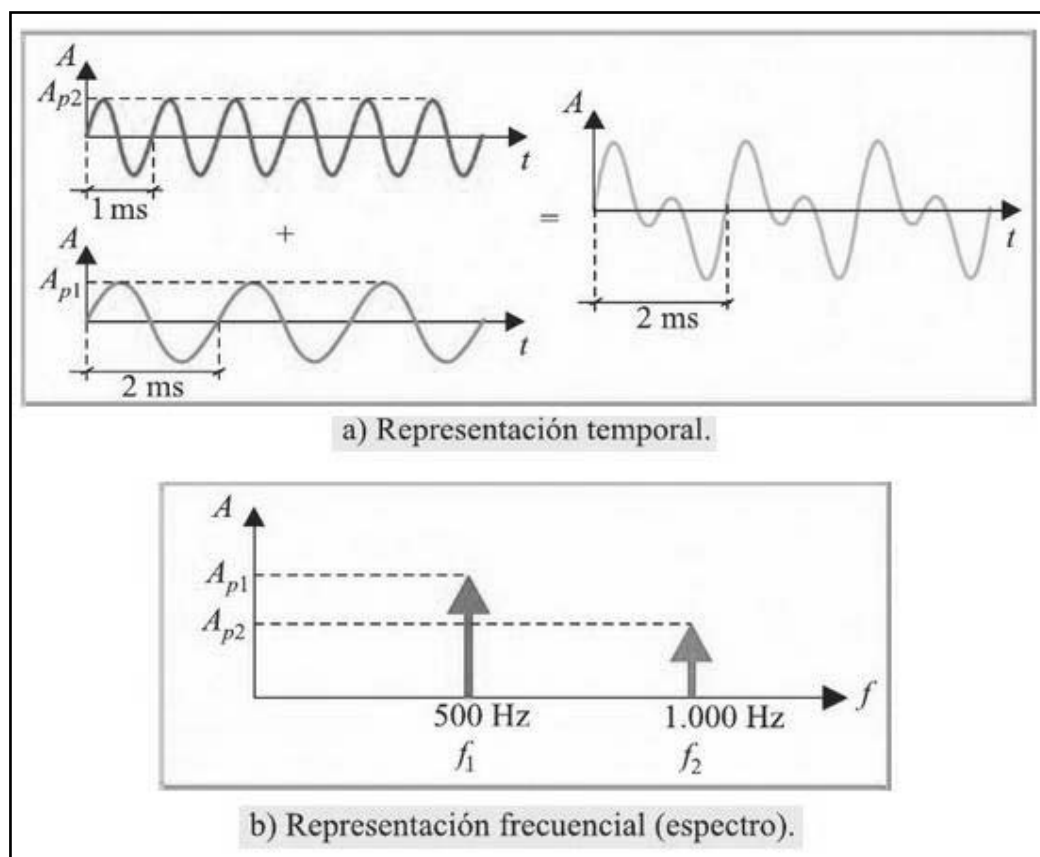


Figura I.A.6. Representación temporal y frecuencial de un sonido periódico complejo [24].



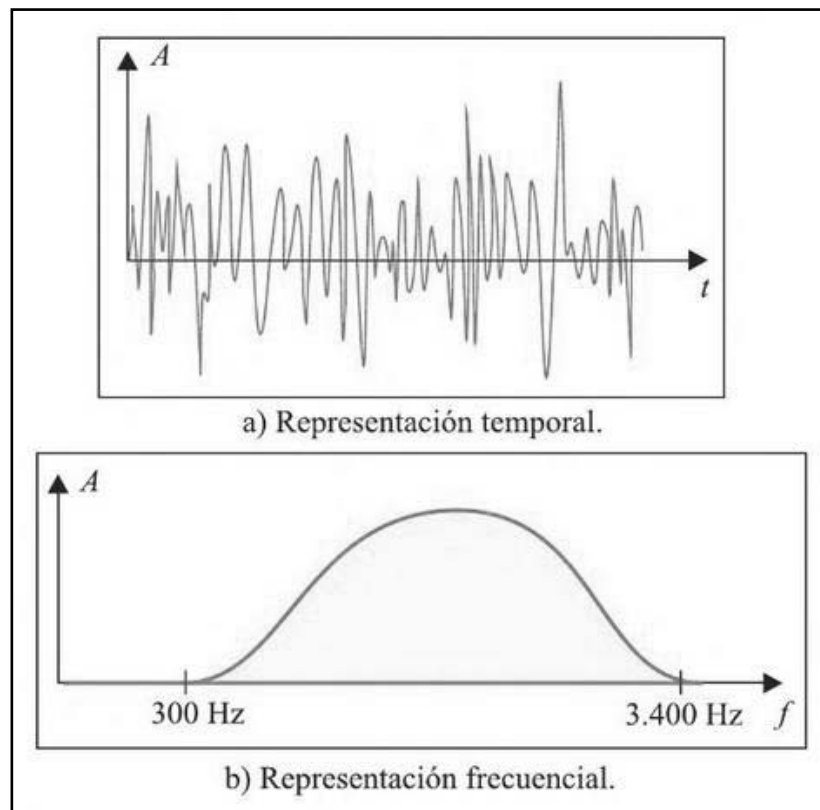
En la siguiente ecuación se ilustra la forma de descomponer un sonido periódico complejo mediante la serie de Fourier conocida su frecuencia fundamental:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \text{Sen}(n\omega t - \varphi_n)$$

siendo  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , las amplitudes correspondientes a cada armónico y  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ , sus respectivas fases.

### 3.2. Sonido no periódico o aleatorio

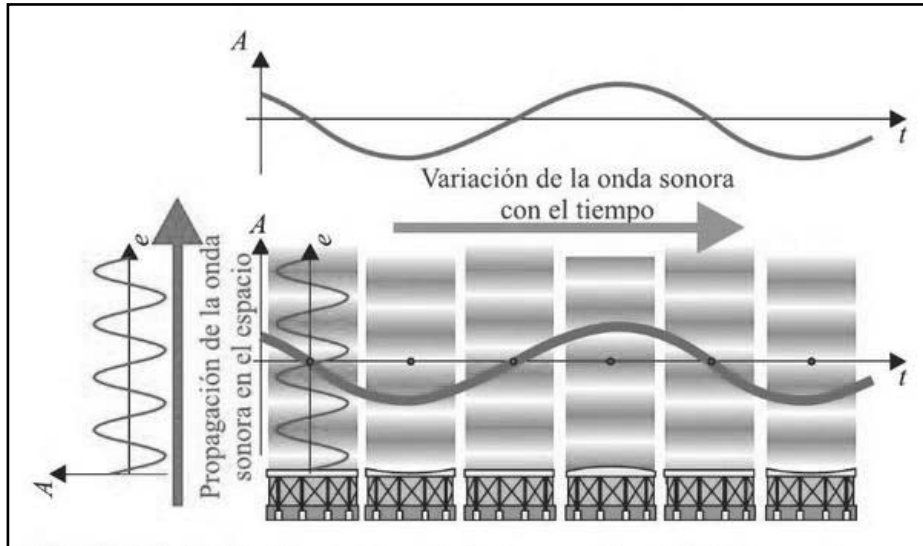
Este tipo de sonido es también denominado inarmónico. Está formado “por la superposición de infinitos tonos puros, con frecuencias infinitamente próximas y de amplitudes diferentes, [...] lo que no permite una representación discreta del espectro frecuencial”. “Aún así, las señales admiten una representación estadística, de forma continua, que determina la probabilidad de que la señal contenga una de las frecuencias” [24]. El ejemplo más habitual de sonidos aleatorios son los ruidos.



**Figura I.A.7.** Representación temporal y frecuencial de un sonido no periódico [24].

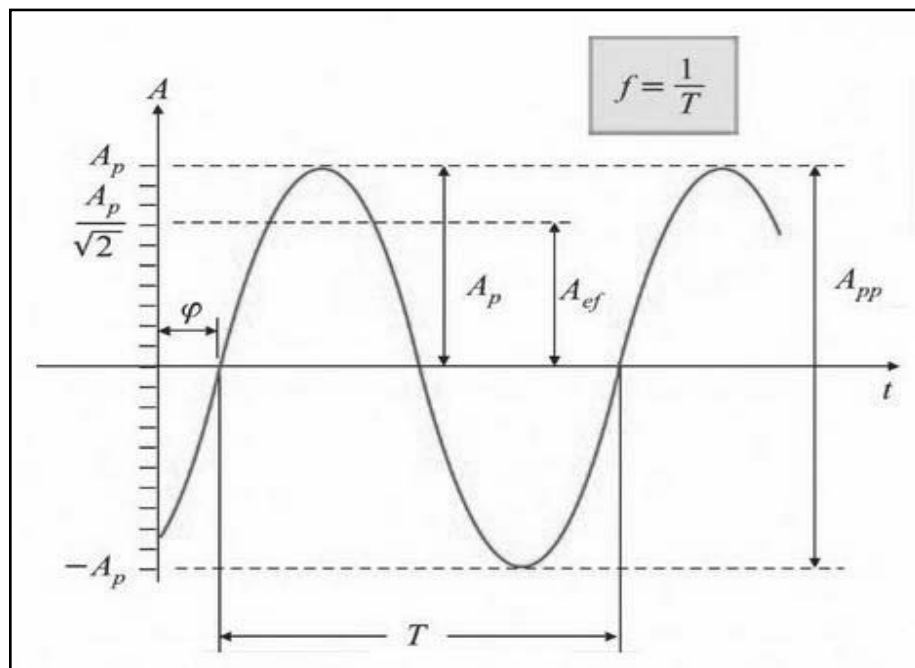
#### 4. Magnitudes físicas del sonido

“Una onda sonora queda caracterizada por la variación temporal de la presión sonora en un punto determinado. El caso más sencillo de estudio se produce cuando la variación de la presión sonora en un punto con el tiempo da lugar a una forma de onda senoidal o tono puro” (figura I.A.8) [24].



**Figura I.A.8.** Variación temporal de la presión acústica en un punto [24].

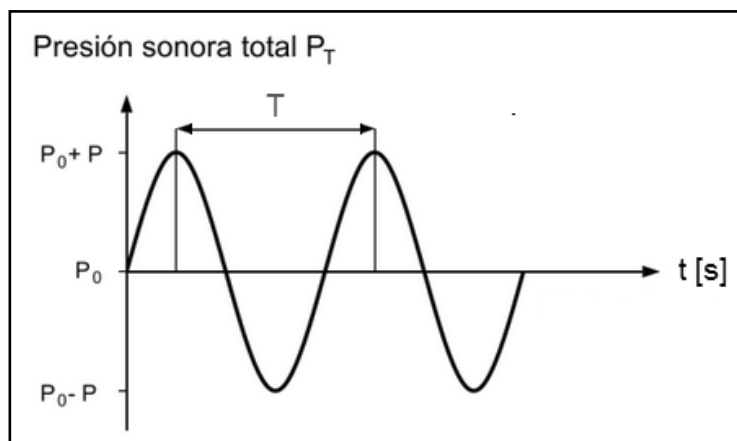
Las principales magnitudes físicas asociadas al sonido son la amplitud, el periodo, la frecuencia, la fase, la longitud de onda y la velocidad.



**Figura I.A.9.** Representación temporal de una onda sinusoidal [24]. Magnitudes reflejadas: amplitud (A), periodo (T), frecuencia (f) y fase ( $\varphi$ ).  $A_{pp}$ =amplitud pico-pico,  $A_p$ = amplitud pico,  $A_{ef}$ = amplitud eficaz.

### 4.1. Amplitud, A

La amplitud indica la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total  $P_T$  respecto a su valor de equilibrio ( $P_0$ ) (**figura I.A.10**) [13]. A mayor presión sonora, mayor cantidad de energía tiene la onda sonora y genera una sensación auditiva de mayor intensidad [24].



**Figura I.A.10.** Variación temporal de la presión acústica en tono puro. Periodo ( $T$ ) de la señal.

Si la amplitud se representa en forma de presión acústica la unidad utilizada es el Pascal [Pa] o Newton/metro<sup>2</sup> [N/m<sup>2</sup>]. No obstante, en acústica, normalmente no se utilizan directamente las magnitudes lineales expresadas en unidades del Sistema Internacional. En su lugar se emplea el concepto de nivel de presión sonora (SPL), expresado en decibelios [dB] [13].

### 4.2. Periodo, T

Determina la duración de un ciclo de la señal (**figura I.A.10**). Se mide en segundos [s] [24].

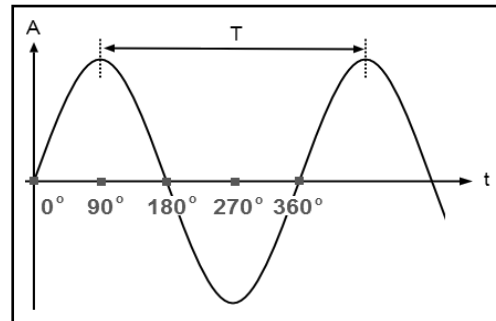
### 4.3. Frecuencia, f

Indica el número de ciclos de la onda sonora que ocurren en un segundo. Se mide en Hertzios [Hz] o ciclos por segundo [c/s]. El periodo ( $T$ ) y la frecuencia ( $f$ ) están relacionados como indica la siguiente ecuación [24]:

$$f \text{ [Hz]} = \frac{1}{T}$$

#### 4.4. Fase, $\varphi$

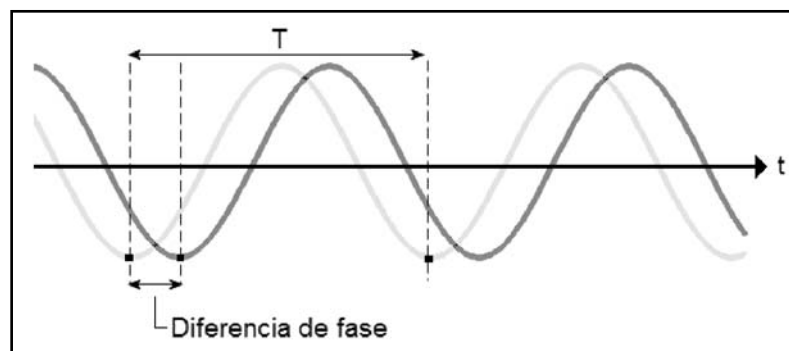
Establece el punto de inicio de un ciclo de la señal respecto a un punto origen de referencia (**figura I.A.9**) [24]. Se mide en términos de ángulo, en grados o radianes.



**Figura I.A.11.** Fases de una onda sinusoidal.

##### 4.4.1. Diferencia de fase (*phase shift*)

La diferencia de fase entre dos formas de onda también se denomina desplazamiento de fase. Un desplazamiento de  $90^\circ$  implica un desfase de  $1/4$  del periodo de una onda ( $T$ ) y uno de  $360^\circ$  evidencia un retraso de un ciclo o de un periodo de onda ( $T$ ), lo que implica que no existe desplazamiento. La diferencia de fase puede ser considerada positiva o negativa y, por lo tanto, una forma de onda puede estar retrasada o avanzada en relación con otra [13].



**Figura I.A.12.** Ejemplo de diferencia de fase entre dos ondas senoidales.

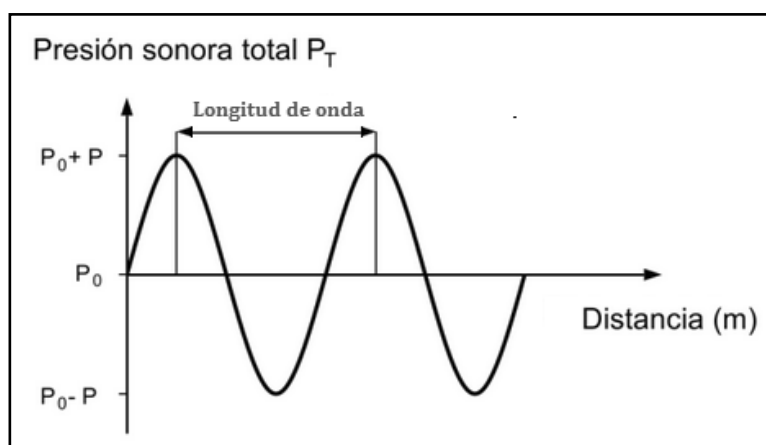
#### 4.5. Velocidad, $c$

La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio a través del cual viajan las ondas sonoras y de los cambios de temperatura del mismo. Cuanto más denso y menos elástico sea el medio, mayor será la velocidad del sonido. Por ello, en general, la velocidad del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y en los líquidos que en los gases. Por otro lado, un aumento de la temperatura del medio se traduce en un incremento de

la frecuencia de las interacciones entre las partículas que transportan la vibración. Esta mayor actividad conlleva un aumento de la velocidad ( $c$ ). Se mide en metros por segundo [m/s], siendo el valor de esta en el aire y a una temperatura de 20°C de 343 m/s [13].

#### 4.6. Longitud de onda, $\lambda$

Se define como la distancia entre dos puntos consecutivos de una onda que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempo. Por ejemplo, si en un instante dado se seleccionan dos puntos consecutivos donde los valores de presión de la onda son máximos, la longitud de onda es precisamente la distancia entre ambos puntos (**figura I.A.13**) [13]. Se mide en metros.

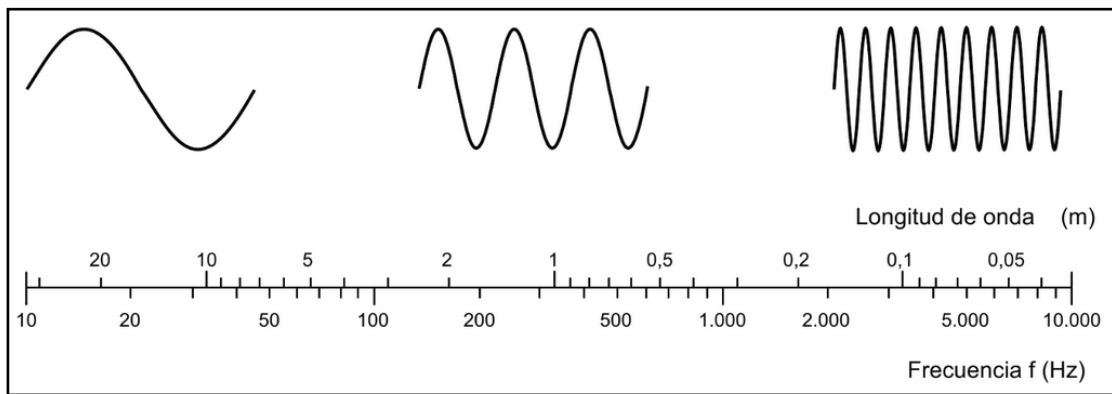


**Figura I.A.13.** Longitud de onda ( $\lambda$ ).

La relación entre las tres magnitudes: frecuencia ( $f$ ), velocidad de propagación ( $c$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ), viene dada por la siguiente expresión [13]:

$$\lambda [m] = \frac{c}{f}$$

Tal y como se observa en la anterior ecuación, “la longitud de onda depende del medio de propagación, ya que es proporcional a la velocidad, y esta varía para cada medio. Por otro lado, la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales” [13]. En la **figura I.A.14** se representa un nomograma de la relación entre la longitud de onda y la frecuencia dentro del espectro audible (20 Hz – 20KHz) que corresponden con longitudes de onda entre 17,25 m y 1,72 cm [13].



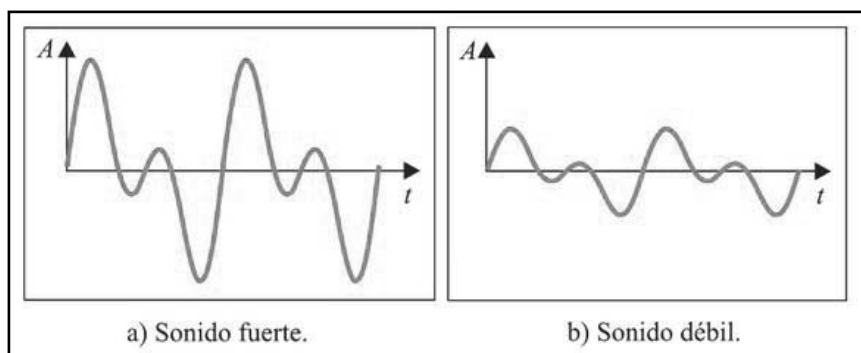
**Figura I.A.14.** Relación entre la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $f$ ) [13].

## 5. Cualidades del sonido

El ser humano mediante su aparato auditivo es capaz de distinguir unos sonidos de otros porque el oído es sensible a las diferencias que pueden existir entre ellos en lo que concierne a alguna de las cuatro cualidades que caracterizan todo sonido y que son: la intensidad, el tono o altura, el timbre y la duración. Aunque las tres primeras se refieren al sonido fisiológico, están relacionadas con las siguientes propiedades de las ondas sonoras: la amplitud, la frecuencia y el espectro armónico o forma de onda respectivamente [24].

### 5.1. Intensidad

La intensidad permite evaluar cuantitativamente la cantidad de energía acústica que contiene un sonido, es decir, lo fuerte o débil que es este. Está relacionada con la amplitud de la onda sonora y viene determinada por la potencia de la fuente de sonido y la distancia del receptor a esta fuente [24].



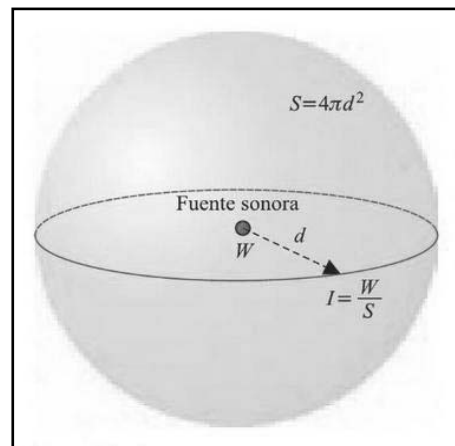
**Figura I.A.15.** Representación temporal de un sonido fuerte y uno débil [24].

### 5.1.1. Intensidad acústica (I)

La intensidad sonora (I) se define como la energía acústica (W) que atraviesa por segundo una superficie unidad (S) dispuesta perpendicularmente a la dirección de propagación. Equivale a una potencia por unidad de superficie y se expresa en *watios* por metros al cuadrado [ $\text{w}/\text{m}^2$ ] [24].

Considerándose una fuente puntual omnidireccional (**figura I.A.16**) con una potencia W, la intensidad del sonido a una distancia  $d$  es:

$$I \text{ [W/m}^2\text{]} = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi d^2}$$



**Figura I.A.16.** Intensidad sonora [24].

El oído es capaz de detectar sonidos a partir de cierto valor de intensidad, denominado valor umbral de audición, siendo el mínimo de intensidad de energía audible del orden de  $10^{-12}$   $\text{w}/\text{m}^2$ . Análogamente, existe un valor de la intensidad sonora, variable también con la frecuencia, a partir de cual un sonido produce dolor. A este umbral se le denomina umbral del dolor y tiene una intensidad sonora de  $1 \text{ w}/\text{m}^2$ .

### 5.1.2. Nivel de intensidad sonora ( $L_I$ )

El nivel de intensidad sonora ( $L_I$ ) permite evaluar la intensidad acústica empleando como unidad de medida el decibelio [dB]. Viene definida por la siguiente relación logarítmica:

$$L_I[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

donde I es la intensidad de energía del sonido en el punto de estudio e  $I_0$  es un nivel de referencia. Para el aire el valor de  $I_0$  corresponde al umbral de audición:  $10^{-12} \text{ w}/\text{m}^2$  [24].

Un nivel de intensidad sonora de de 0 dB equivale al umbral de audición y uno de 120 dB equivale al del dolor.

## 5.2. Tono o altura

El tono de un sonido queda determinado por la frecuencia fundamental de las ondas sonoras. La altura permite clasificar los sonidos en graves, medios y agudos. Si la frecuencia de un sonido es baja (pocas vibraciones por segundo), este es grave. En cambio, si la frecuencia es alta (gran número de vibraciones por segundo) se considera que el sonido es agudo [24].

Cuando se oye un sonido armónico, la mayoría de las personas escucha el tono que corresponde a la frecuencia fundamental, incluso cuando esta no existe debido a fenómenos de interferencias.

El **espectro audible** es el conjunto de frecuencias que el oído humano es capaz de percibir. Como norma general se considera que para una persona sana el espectro audible corresponde a las frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20 KHz.

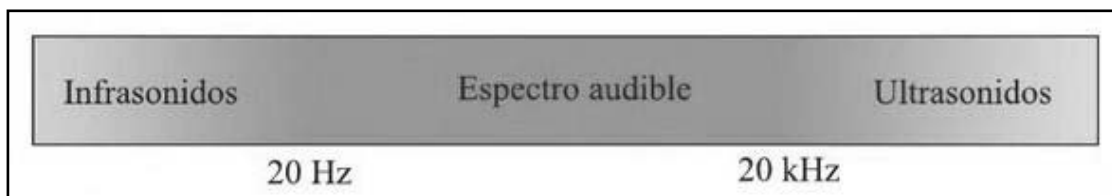


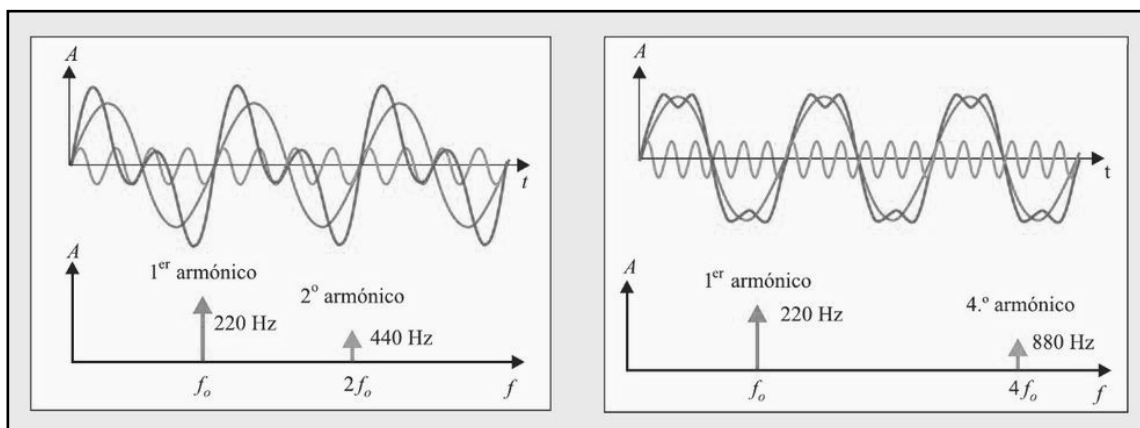
Figura I.A.17. Espectro audible [24].

## 5.3. Timbre

El timbre es la cualidad que permite diferenciar entre dos sonidos diferentes que tengan idéntica intensidad y la misma frecuencia fundamental, es decir, la misma altura. Esto es posible gracias a que cada sonido tiene un timbre característico, determinado por las características de su espectro [24]. Si bien es la cualidad del sonido más fácil de distinguir, es tal vez la más difícil de comprender analíticamente.

Cualquier sonido periódico complejo o armónico se puede analizar como un sonido de mayor amplitud y de frecuencia más baja, llamado fundamental, y una suma de sonidos con menor intensidad y mayor frecuencia, llamados armónicos o sobretonos. Estos armónicos tienen diferentes frecuencias e intensidades en relación al fundamental y es esto justamente lo que determina el timbre de ese sonido (**figura I.A.18**).





**Figura I.A.18.** Representación temporal y frecuencial de dos sonidos armónicos con la misma frecuencia fundamental (mismo tono), que se corresponde con la nota La3 (220Hz). Cada sonido tiene un timbre característico ya que sus armónicos son diferentes [24].

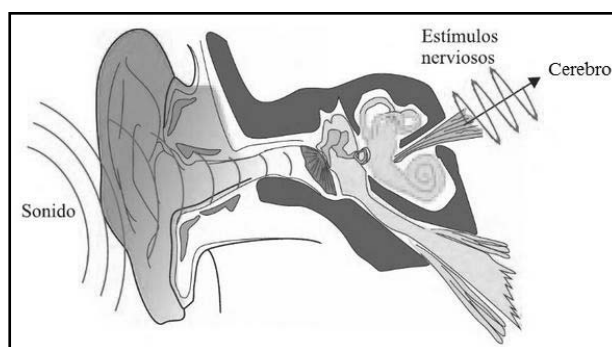
Los sonidos formados por ondas no periódicas, o más comúnmente denominados ruidos, la cualidad del timbre también se encuentra presente. Aunque no existan armónicos ni un sonido fundamental como se ha visto anteriormente, cada ruido posee su propio timbre, ya que su energía sonora estará repartida a lo largo del espectro de frecuencias de una forma característica y única respecto a otros sonidos.

#### 5.4. Duración

La duración de un sonido queda determinada por el tiempo de vibración de la fuente sonora. En función su duración, los sonidos pueden clasificarse en continuos o impulsivos.

### 6. La audición

Los sonidos que se producen a nuestro alrededor llegan a nuestros oídos desplazándose principalmente a través del aire en forma de ondas de presión. El sentido del oído es un sistema acústico acoplado encargado de convertir las perturbaciones del exterior en sensaciones internas, traduciendo la energía sonora que alcanza al aparato auditivo en señales nerviosas que son procesadas en las áreas corticales auditivas del cerebro [24].

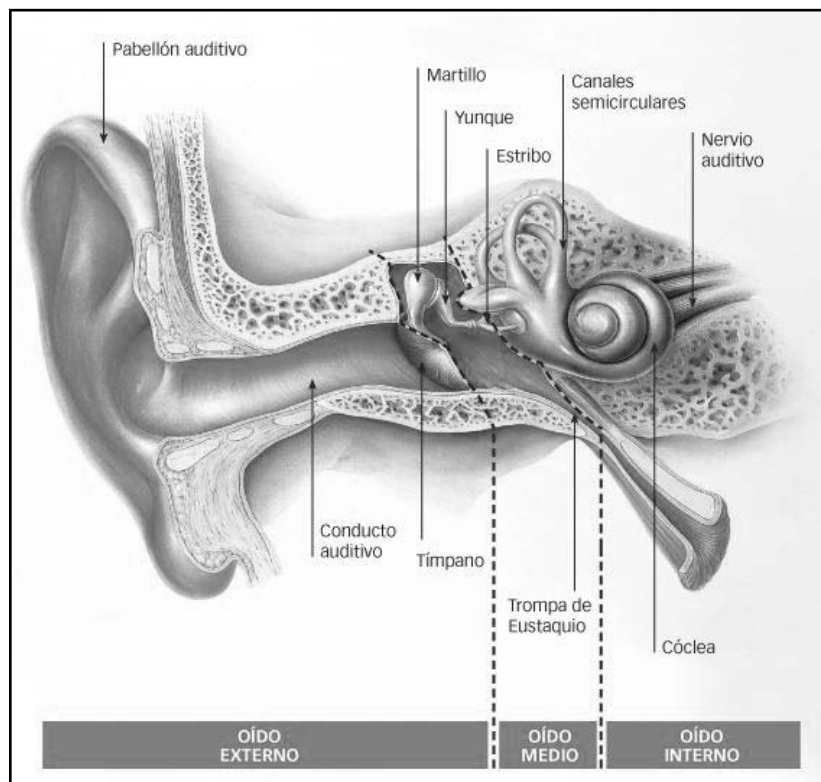


**Figura I.A.19.** Sentido del oído [24]

## 6.1. El sistema auditivo

El oído humano se divide en tres partes, cada una de ellas con un cometido específico: el oído externo, que ejerce la función de receptor; el oído medio, encargado de la transmisión y amplificación; y el oído interno, aparato de percepción [14].

- El **oído externo** comprende el pabellón auricular, el canal auditivo y el tímpano. La oreja, de naturaleza cartilaginosa, constituye el pabellón receptor que concentra las ondas acústicas hacia el canal auditivo, un conducto óseo de aproximadamente 2,5 cm de longitud que finaliza en la cara externa del tímpano. Este último es una membrana elástica que vibra como respuesta a las ondas de presión incidentes en su superficie de un modo prácticamente idéntico.
- El **oído medio** se compone de una cadena de huesecillos unidos por ligamentos. La vibración del tímpano desplaza al martillo quien, por medio del yunque y del estribo, hace presión sobre la cóclea. El conjunto forma un sistema de palancas, reduciendo el movimiento pero incrementando la presión transmitida hacia la ventana oval, en donde comienza el oído interno. En el oído medio también se localiza la trompa de Eustaquio, un conducto de aire que posibilita conservar la presión del oído interno al mismo valor que la presión atmosférica exterior.



**Figura I.A.20.** Sistema auditivo.

- El **oído interno** está constituido fundamentalmente por la cóclea, los canales semicirculares y el nervio auditivo. La cóclea es un canal en forma de espiral que contiene fluido y está dividido longitudinalmente por la membrana basilar. Esta última está compuesta por miles de células ciliares sensoriales distribuidas en filas y empapadas en el líquido del interior de la cóclea. Dichas células, también conocidas como cilios, están conectadas a las terminaciones nerviosas del nervio auditivo en las que se crea impulsos eléctricos que se transmiten al cerebro por el nervio auditivo.

## 6.2. Sensaciones psicoacústicas

### 6.2.1. Sonoridad

“La sonoridad se define como la sensación subjetiva de la intensidad de sonido que percibe el ser humano” [24].

Como norma general el oído humano percibe los sonidos de frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20 kHz. No obstante, su sensibilidad varía con la frecuencia, es decir, el sistema auditivo es capaz de percibir mejor los eventos sonoros a unas frecuencias que a otras. La audibilidad de un sonido obedece también su intensidad, por ejemplo, un sonido muy débil puede no ser percibido a ciertas frecuencias pero sí a otras.

Para evaluar la sonoridad de las señales acústicas se emplean las curvas isofónicas (o de igual sonoridad). Estas indican el nivel de presión sonora que debe tener un sonido de una frecuencia determinada para producir la misma sonoridad que un tono puro de frecuencia 1kHz y un nivel de sonoridad dado.

Estas curvas de respuesta en frecuencia miden los niveles fisiológicos en fonios. El fonio es una unidad sin dimensión que sirve para caracterizar la sensación auditiva. A la frecuencia de 1 kHz los valores en fonios son equivalentes a los niveles en decibelios. Un sonido de 50 fonios es percibido por el oído humano tan “fuerte” como un sonido de 50 dB y 1 kHz. De esta manera, la curva que se corresponde con el umbral de audición es la curva de 0 fonios (0 dB a 1 kHz), mientras que la curva del umbral de dolor se corresponde con la de 120 fonios (120 dB a 1 kHz).

Las curvas isofónicas (**fig. I.A.21**) fueron creadas por Fletcher y Munson. Estos tomaron como referencia la escala de niveles de presión sonora en dB para la frecuencia de 1 kHz y luego determinaron mediante comparaciones y sucesivas escuchas de diferentes frecuencias,

los niveles de presión sonora para los cuales la sensación sonora es idéntica a la de un sonido modelo de 1 kHz.

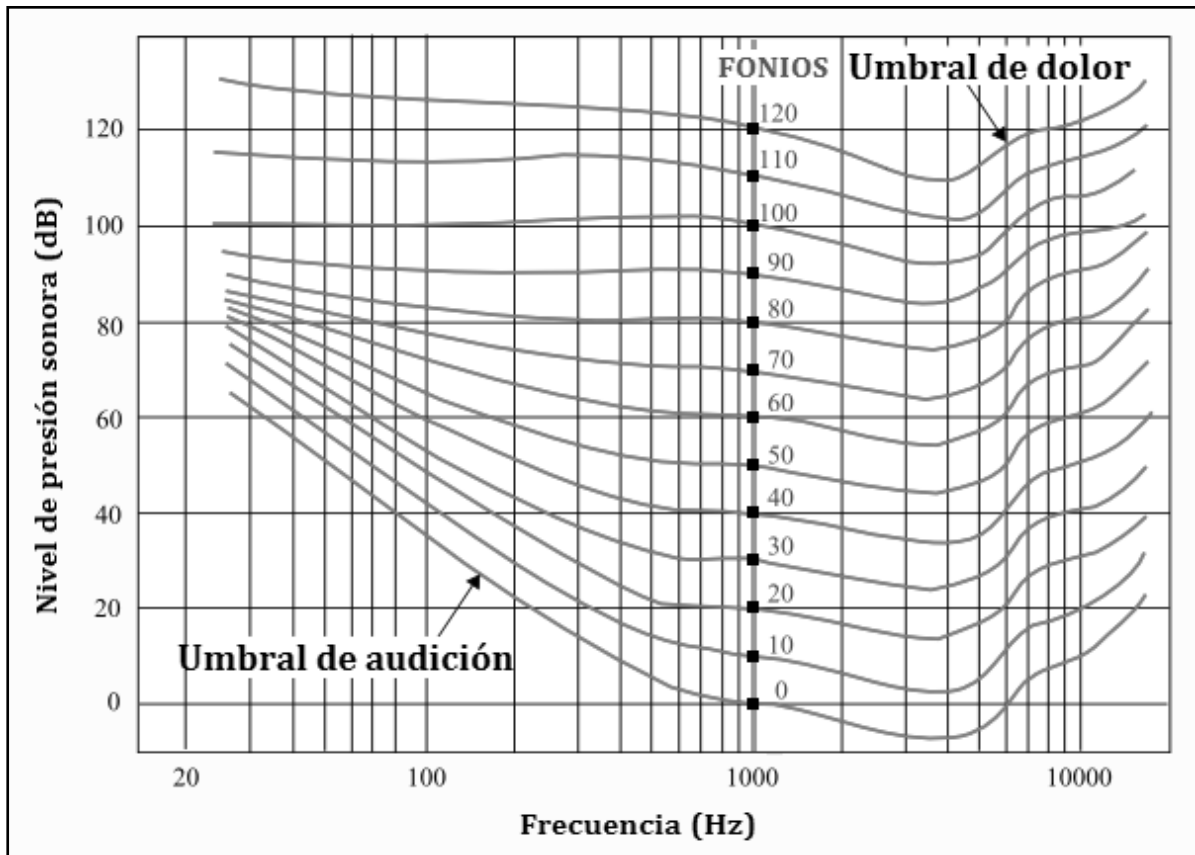


Figura I.A.21. Curvas de isofonía.

El oído es más lineal para los niveles elevados de intensidad, tal y como se manifiesta en las curvas superiores relativamente rectas. En cambio, para sonidos débiles nuestro sistema auditivo presenta una respuesta en frecuencia más dispar. El oído demuestra su mayor sensibilidad para el rango de frecuencias comprendidas entre 2 y 5 kHz.

## 6.2.2. Direccionalidad

### 6.2.2.1. Efecto difractor de la cabeza

Un solo oído puede determinar el tono, la sonoridad e incluso el timbre de un sonido, pero no la situación exacta de la fuente emisora. Son los dos oídos, separados por unos 17 cm y con un obstáculo entre ellos, la cabeza, que difracta o dispersa el sonido, lo que nos permite localizar la dirección de una fuente sonora. Esto se explica por la diferencia de percepción existente entre los dos oídos ya que cada uno de ellos percibe fases del sonido diferentes. Las señales recibidas por cada oído no son idénticas especialmente si se trata de frecuencias superiores a los 1kHz.

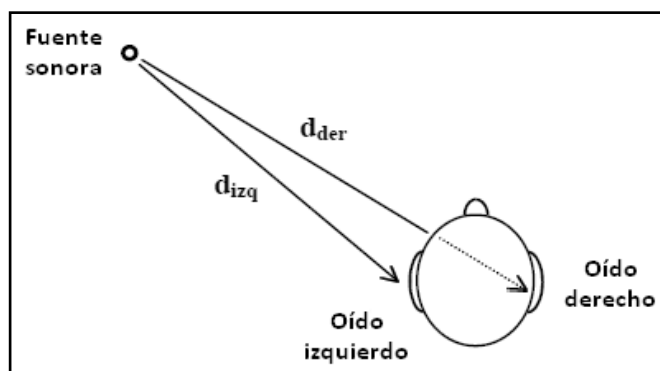


Figura I.A.22. Recorrido del sonido entre la fuente sonora y cada oído.

Cuando un sonido proviene de la derecha o de la izquierda, existe una diferencia de fase positiva o negativa y el cerebro la interpreta como una dirección de escucha. Si la fuente sonora está situada a nuestra izquierda, el oído derecho percibe un sonido ligeramente más débil y un poco más tarde que el oído izquierdo, ya que  $d_{\text{der}} > d_{\text{izq}}$ , tal y como se representa en la **figura I.A.22**. En cambio, cuando la fuente sonora se encuentra frente al oyente, la diferencia de fase es nula. La diferenciación entre un sonido que proviene de delante o de detrás es facilitada por el hecho de que los pabellones de la oreja constituyen antenas directivas que captan mejor los sonidos delanteros que traseros.

#### 6.2.2.2. Efecto Haas

El efecto de precedencia o efecto Haas tiene se produce cuando el cerebro recibe información de dos o más sonidos producidos por diferentes fuentes sonoras con un retardo inferior a 50 ms. En este caso, el cerebro fusiona todos los sonidos y los interpreta como uno sólo, entendiendo los sonidos posteriores como una reverberación del primero de ellos. La localización de la nueva fuente ficticia imaginada por el cerebro depende de la intensidad sonora percibida de cada uno de los sonidos, tal y como se muestra en la **figura I.A.23**.

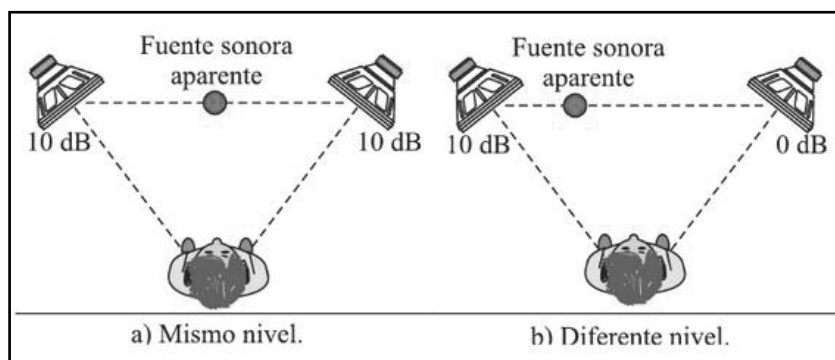
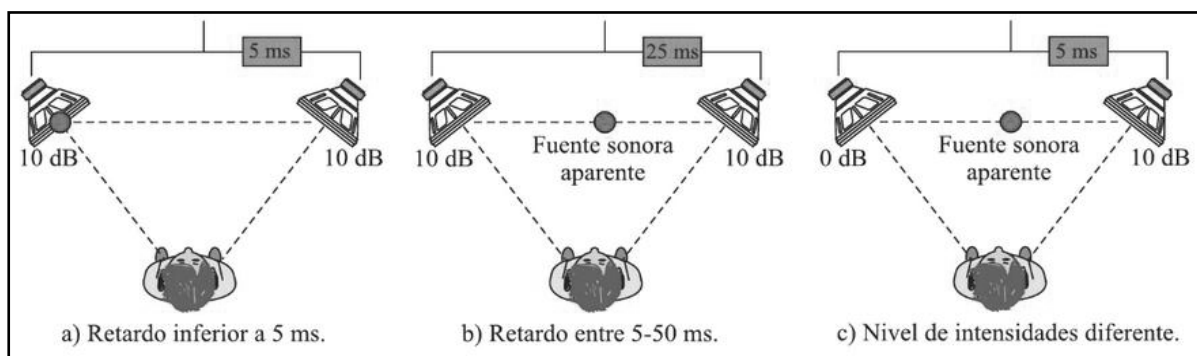


Figura I.A.23. Efecto Haas. Localización de la nueva fuente sonora aparente según las intensidades de cada emisor [24].

No obstante, la magnitud del retardo existente entre los eventos sonoros recibidos también influye en la interpretación que lleva a cabo el cerebro.

- **Retardo inferior a 5 ms:** el emisor se sitúa en la dirección del primer estímulo.
- **Retardo entre 5 y 50 ms:** el cerebro interpreta un sonido con mayor intensidad, pero localizado en un punto intermedio entre las diferentes fuentes sonoras.

Para que el retardo no determine la dirección del sonido, es decir, este se perciba proveniente de un punto central, la señal retrasada debe de tener un mayor nivel de intensidad sonora que la primera (figura I.A.24.c).



**Figura I.A.24.** Efecto Haas. Localización de la nueva fuente sonora aparente según las intensidades de cada fuente emisora y el retardo existente entre ellas [24].

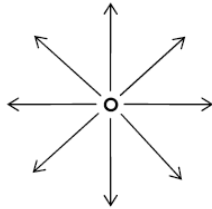
Esta característica de la audición humana permite que podamos oír los sucesivos impactos de un espectro armónico como un flujo continuo de sonido. Esta combinación que realiza nuestro sentido del oído a lo largo de un pequeño intervalo de tiempo explica cómo la fusión de los armónicos da como resultado el timbre, mientras que su separación se traduce en la escucha de notas individuales. Las oscilaciones separadas por más de unas 50 ms pueden no fusionarse en forma de timbre, sino dar lugar a otras notas, aunque hay un amplio margen dentro del cual podemos oírlas de una forma u otra según cuál sea el modo en que dirijamos nuestra atención mental.

### 6.2.3. Espacialidad

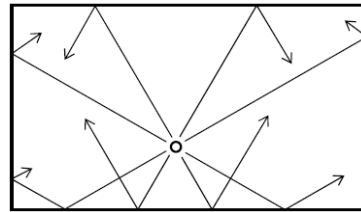
La espacialidad permite asociar un sonido con el ambiente en el cual se propaga y estimar, por ejemplo, las dimensiones de una sala sin necesidad de recurrir a la vista. Depende de los siguientes cuatro factores [31]:

- **Distancia entre la fuente y el oído.** Conforme aumenta la distancia, la presión sonora disminuye. Esto hace que si se conoce la fuente, se pueda tener una idea de la distancia.

- **Reflexiones tempranas.** En condiciones de campo libre, las ondas sonoras generadas por una fuente se alejan indefinidamente atenuándose hasta volverse inaudibles. Sin embargo, en un ambiente cerrado, se reflejan múltiples veces en las superficies que lo encierran. Las reflexiones tempranas, también denominadas primeras reflexiones, proporcionan al sistema auditivo una clave temporal que se relaciona con la distancia entre las paredes, lo cual a su vez se vincula al tamaño de la sala.



**Figura I.A.25.** Una fuente sonora en campo abierto [31].



**Figura I.A.26.** Una fuente sonora dentro de un ambiente cerrado [31].

- **Reverberación.** El fenómeno de la reverberación se produce como consecuencia de las numerosas reflexiones tardías del sonido. Mientras las primeras reflexiones están distanciadas considerablemente, las tardías comienzan a superponerse entre sí dando lugar a la llamada cola de reverberación. El efecto más conocido de la reverberación es la permanencia del sonido en el ambiente durante algunos instantes aunque se interrumpa la emisión de la fuente sonora. El tiempo de permanencia o de reverberación depende de las características acústicas del ambiente.
- **El movimiento de la fuente.** Fundamentalmente la movilidad es percibida a través del efecto Doppler, por el cual la frecuencia de una fuente móvil parece cambiar según esta se acerque al oyente (escucha frecuencias algo más agudas a la real) o se aleje (paulatinamente oye frecuencias más graves a la real).

Los aspectos referentes a la acústica de recintos se amplían en el Anexo I.B del presente documento.

#### 6.2.4. Enmascaramiento

La diferencia de amplitud entre dos sonidos muy próximos entre sí en el tiempo y/o en frecuencia da lugar al fenómeno conocido como enmascaramiento (*masking*) [32]. Este efecto puede provocar que señales que están por encima del umbral de audición no sean percibidas por el oído, debido a que están enmascaradas por otras de nivel superior. Por ejemplo, la conversación que tenga lugar en una estancia contigua puede ser encubierta por el ruido de fondo del tráfico exterior cuando tenemos la ventana abierta. Por la noche, cuando el ruido

externo es prácticamente nulo, se puede diferenciar claramente la misma conversación [24]. Existen dos tipos de enmascaramiento [31]:

- **Enmascaramiento temporal** (*temporal masking*). El sonido de mayor amplitud ‘eclipsará’ o enmudecerá a aquel o aquellos que sean reproducidos simultáneamente o instantes después del mismo.

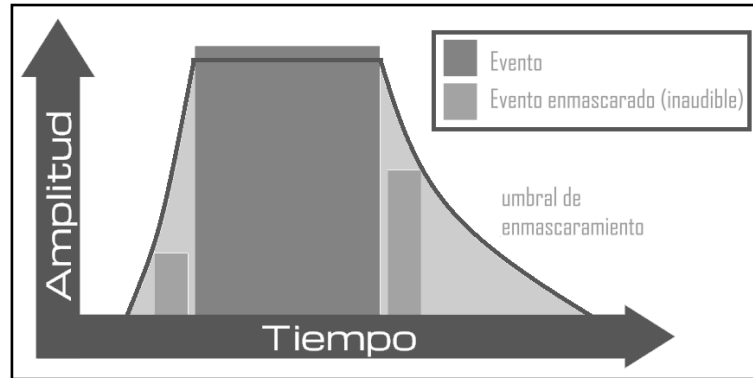


Figura I.A.25. Efecto del enmascaramiento temporal [31].

- **Enmascaramiento espectral** (*frequency masking*). El sonido de mayor amplitud ‘eclipsará’ o enmudecerá a aquel o aquellos que se encuentren suficientemente próximos al mismo en el espectro.

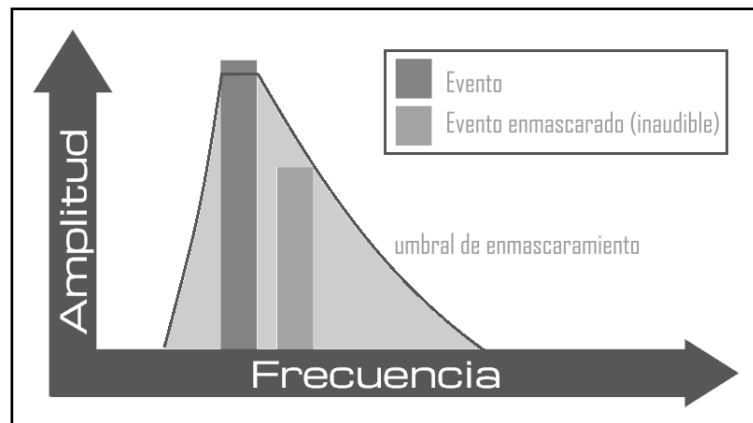


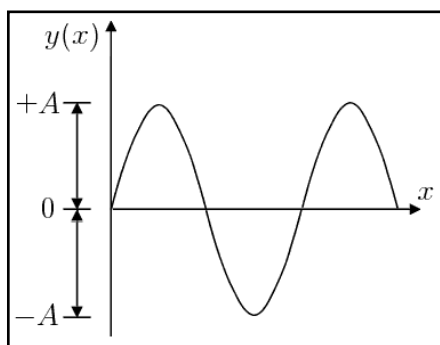
Figura I.A.26. Efecto del enmascaramiento espectral [31].



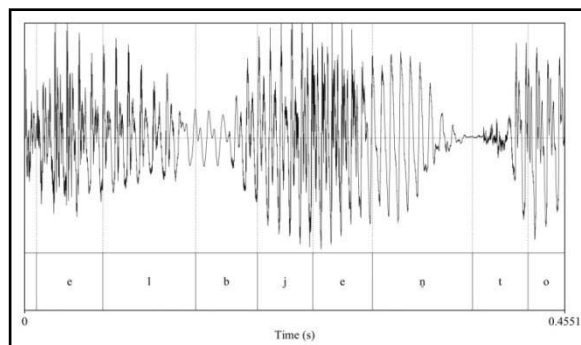
## 7. Representaciones gráficas del sonido

### 7.1. Forma de onda

Es la representación gráfica del valor instantáneo de una señal en el dominio de tiempo. Puede obtenerse mediante un osciloscopio o una aplicación *software* que simule su funcionamiento. En el eje de abscisas (X) se refleja el tiempo y en el eje de ordenadas (Y) la amplitud de la señal.



**Figura I.A.27.** Forma de onda de un tono senoidal puro.



**Figura I.A.28.** Forma de onda del enunciado: "el viento".

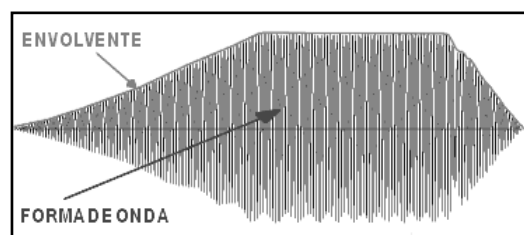
#### 7.1.1. Envolvente

Una característica que diferencia un sonido de otro es la evolución de su amplitud, intensidad o potencia a través del tiempo, es decir, desde el ataque o aparición del sonido hasta que su extinción. Se denomina envolvente a la curva que encierra a la forma de onda uniendo todos los picos o valores máximos del sonido [33].

A continuación, en las **figuras I.A.29** y **I.A.30** se muestran dos formas de ondas diferentes. La primera de ellas pertenece a una nota musical tocada por un piano y la segunda a la misma nota musical interpretada por un violín. La curva envolvente del sonido de un piano se caracteriza por un fuerte ataque y una lenta extinción del sonido mientras la tecla se mantenga pulsada. Sin embargo, la del violín posee un ataque suave, seguido de un mantenimiento de la intensidad del sonido mientras se frota la cuerda y, finalmente, al soltar el arco, se produce una rápida caída del sonido [33].



**Figura I.A.29.** Forma de onda de una nota interpretada por un piano [33].

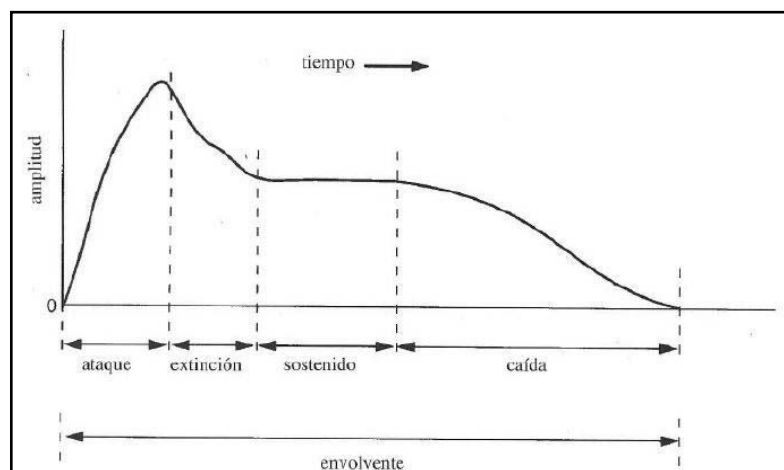


**Figura I.A.30.** Forma de onda de una nota tocada por un violín [33].

La envolvente suele simplificarse en cuatro fases: Ataque, Decaimiento, Sostén y Relajación. A menudo a las curvas de envolvente se las conoce como *ADSR*, ya que son las iniciales en inglés de dichas fases: *Attack*, *Decay*, *Sustain* y *Release*.

- **Ataque.** Es el tiempo que tarda el sonido en alcanzar su máxima amplitud. Este período se caracteriza por la presencia de oscilaciones algo irregulares puesto que el sonido no ha terminado de estabilizarse. En el caso del piano, la tabla armónica no comienza a oscilar en el preciso momento en que el martillo golpea la cuerda sino que tiene que transcurrir cierto tiempo antes de que la cuerda le transfiera la energía que le permita oscilar regularmente. Además, en general, los sonidos emitidos por instrumentos musicales suelen contener durante el periodo de ataque ruidos parásitos generados por los mecanismos de acción de martillos, llaves, etc.
- **Decaimiento.** Tras el momento de ataque, donde se alcanza el máximo de amplitud, a veces la intensidad del sonido disminuye levemente, constituyendo la fase de decaimiento.
- **Sostenimiento.** Etapa intermedia que comprende el periodo de tiempo en el cual el sonido suena establemente.
- **Relajación (o caída).** Tiempo que tarda en extinguirse completamente el sonido una vez se silencia la fuente emisora, por ejemplo, cuando el flautista deja de soplar, el pianista suelta la tecla, etc.

En la **figura I.A.31** se representa esquemáticamente la evolución temporal típica de un sonido siguiendo las cuatro fases anteriormente mencionadas. Aunque este sea el modelo más conocido, existen envolventes de sonidos que muestran un menor número de fases.



**Figura I.A.31.** Envolvente de forma de onda ADSR (en cuatro fases).

## 7.2. Espectro acústico

La cualidad del timbre de un sonido no es mensurable como las de altura o intensidad. No obstante, se puede caracterizar obteniendo el espectro de frecuencias, sonoro o acústico del sonido. En él se representan (tomando como eje X la frecuencia y como eje Y la amplitud) los diversos tonos parciales que integran un sonido. El espectro acústico se obtiene mediante un analizador de espectro o aplicaciones *software* que simulen su funcionamiento.

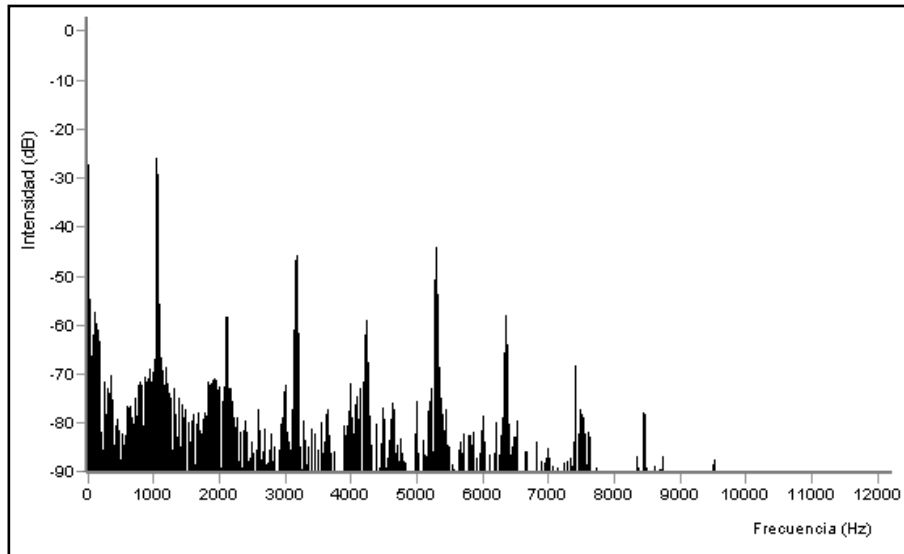


Figura I.A.32. Espectro frecuencial de la nota Do6=1.046 Hz tocada por la flauta.

### 7.2.1. Bandas de frecuencia

Debido a la gran cantidad de sonidos comprendidos en la Banda de Audiofrecuencia (20Hz – 20KHz) y con el fin de organizarlos, estos se clasifican en bandas de frecuencias. Las más usuales son las bandas de octavas y las bandas de tercios de octava.

#### 7.2.1.1. Bandas de octavas

Se denomina Banda de Octava a la gama de sonidos comprendidos entre uno cualquiera y otro situado a su octava. La frecuencia central de cada banda de octavas da nombre a esta y se calcula realizando la media geométrica de sus frecuencias extremas.

$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

Siendo:

$f_1$  = frecuencia de paso inferior.

$f_2$  = frecuencia de paso superior.

La **octava** es la relación entre los sonidos cuyas frecuencias son el doble una de la otra, es decir, están en relación 2:1. Por ejemplo, el sonido 880 Hz es la octava del sonido 440 Hz, ya que el cociente entre ambas frecuencias es 2.

Existen diversos criterios de determinación de las Bandas de Octava teniendo cada uno su campo de aplicación. Entre ellos se destacan el criterio matemático, fisiológico, acústico, musical y el propuesto por la ISO (*International Organization for Standardization*) [34].

- **Criterio matemático**

Así, el criterio matemático está basado en el desarrollo matemático de las potencias de 2. La expresión de este criterio es:  $2^n$ , estando  $n$  comprendida entre 4 y 14 ( $4 \leq n \leq 14$ ).

<b>Centros de octavas (criterio matemático)</b>	
$2^4 =$	16 Hz
$2^5 =$	32 Hz
$2^6 =$	64 Hz
$2^7 =$	128 Hz
$2^8 =$	256 Hz
$2^9 =$	512 Hz
$2^{10} =$	1.024 Hz
$2^{11} =$	2.048 Hz
$2^{12} =$	4.096 Hz
$2^{13} =$	8.192 Hz
$2^{14} =$	16.384 Hz

**Tabla I.A.1.** Valores de los centros de cada banda de octava (criterio matemático).

- **Criterio fisiológico**

Otro criterio de clasificación es el fisiológico, basado en tomar el límite inferior en 20 Hz. La expresión de este criterio es:  $20 \cdot 2^n$ , siendo  $0 \leq n \leq 10$ .

<b>Centros de octavas (criterio fisiológico)</b>	
$20 \cdot 2^0 =$	20 Hz
$20 \cdot 2^1 =$	40 Hz
$20 \cdot 2^2 =$	80 Hz
$20 \cdot 2^3 =$	160 Hz
$20 \cdot 2^4 =$	320 Hz
$20 \cdot 2^5 =$	640 Hz
$20 \cdot 2^6 =$	1.280 Hz
$20 \cdot 2^7 =$	2.560 Hz
$20 \cdot 2^8 =$	5.120 Hz
$20 \cdot 2^9 =$	10.240 Hz
$20 \cdot 2^{10} =$	20.480 Hz

**Tabla I.A.2.** Valores de los centros de cada banda de octavas (criterio fisiológico).

- **Criterio acústico**

Consiste en tomar la frecuencia de 1.000 Hz como patrón de frecuencias. De esta forma, la expresión de este criterio es:  $1.000 \cdot 2^n$ , siendo  $-6 \leq n \leq 4$ .

Centros de octavas (criterio acústico)	
$1000 \cdot 2^{-6} =$	15,625 Hz
$1000 \cdot 2^{-5} =$	31,25 Hz
$1000 \cdot 2^{-4} =$	62,5 Hz
$1000 \cdot 2^{-3} =$	125 Hz
$1000 \cdot 2^{-2} =$	250 Hz
$1000 \cdot 2^{-1} =$	500 Hz
$1000 \cdot 2^0 =$	1.000 Hz
$1000 \cdot 2^1 =$	2.000 Hz
$1000 \cdot 2^2 =$	4.000 Hz
$1000 \cdot 2^3 =$	8.000 Hz
$1000 \cdot 2^4 =$	16.000 Hz

**Tabla I.A.3.** Valores de los centros de cada banda de octava (criterio acústico).

- **Criterio musical**

Se establece en base a tomar la frecuencia patrón de 440 Hz (La4). Su expresión es:  $440 \cdot 2^n$ , cumpliéndose que  $-5 \leq n \leq 5$ .

Centros de octavas (criterio musical)	
$440 \cdot 2^{-5} =$	13,75 Hz
$440 \cdot 2^{-4} =$	27,5 Hz
$440 \cdot 2^{-3} =$	55 Hz
$440 \cdot 2^{-2} =$	110 Hz
$440 \cdot 2^{-1} =$	220 Hz
$440 \cdot 2^0 =$	440 Hz
$440 \cdot 2^1 =$	880 Hz
$440 \cdot 2^2 =$	1.760 Hz
$440 \cdot 2^3 =$	3.520 Hz
$440 \cdot 2^4 =$	7.040 Hz
$440 \cdot 2^5 =$	14.080 Hz

**Tabla I.A.4.** Valores de los centros de cada banda de octava (criterio musical).

Independientemente del criterio de clasificación, el margen entre la frecuencia más grave y la más aguda es de 10 octavas (extensión de la Banda de Audiofrecuencia).

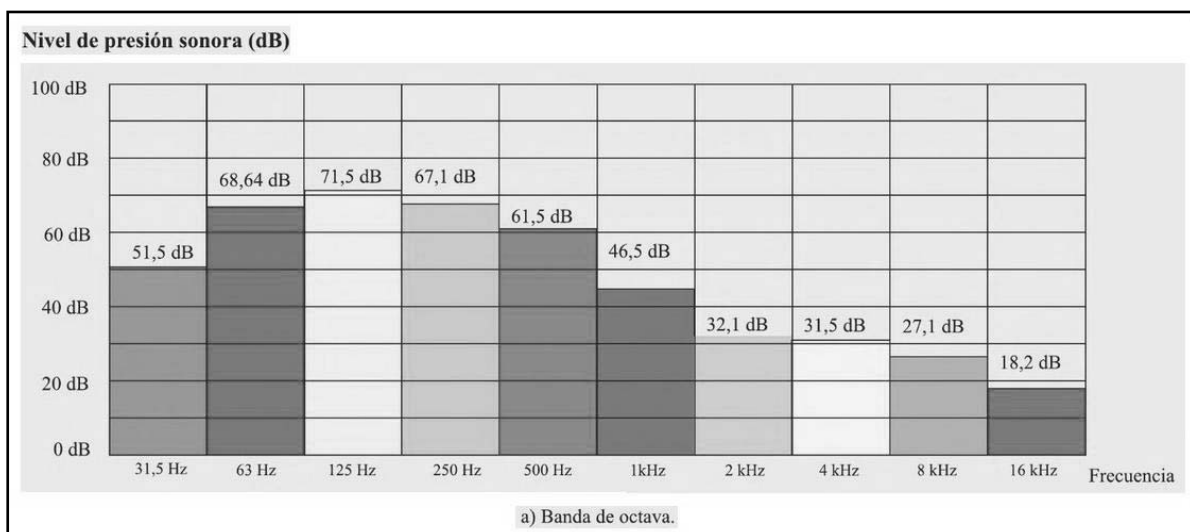
- **Criterio de la norma ISO**

En este Proyecto se ha seguido la **norma ISO**. Según esta, los centros de las bandas de octava normalizadas, así como los límites inferiores y superiores de cada una de ellas, corresponden a las siguientes frecuencias:

Frecuencia inferior	Centro de las Bandas de Octavas (ISO)	Frecuencia superior	Ancho de banda
22 Hz	31,5 Hz	44 Hz	22 Hz
44 Hz	63 Hz	88 Hz	44 Hz
88 Hz	125 Hz	177 Hz	89 Hz
177 Hz	250 Hz	355 Hz	178 Hz
355 Hz	500 Hz	710 Hz	355 Hz
710 Hz	1.000 Hz	1.420 Hz	710 Hz
1.420 Hz	2.000 Hz	2.840 Hz	1.420 Hz
2.840 Hz	4.000 Hz	5.680 Hz	2.840 Hz
5.680 Hz	8.000 Hz	11.360 Hz	5.680 Hz
11.360 Hz	16.000 Hz	22.720 Hz	11.360 Hz

**Tabla I.A.5.** Valores de los centros de las bandas de octavas normalizadas las frecuencias límites y el ancho de banda de cada una de ellas (según la ISO).

A continuación, en la **figura I.A.33** se observa un espectro acústico representado en bandas de octava. En él se muestra la contribución energética de cada banda, es decir, la suma logarítmica de los valores de presión sonora de todas las frecuencias contenidas en ella.



**Figura I.A.33.** Ejemplo del espectro acústico de un sonido en bandas de octava [24].

### 7.2.1.2. Bandas de tercios y de doceavos de octavas

Las bandas de 1/3 de octavas es una clasificación mucho más restrictiva y está basada en dividir la octava en 3 partes. Es decir, dada una frecuencia  $f$ , la banda de tercios de octava correspondiente será la gama de sonidos comprendidos entre  $f$  y  $\sqrt[3]{2}f$ . Siguiendo el mismo razonamiento, las bandas de 1/12 de octava fracciona la octava en 12 partes.

En la siguiente **tabla I.A.6** se presentan los centros de bandas normalizados para bandas de octava, tercios de octava y doceavos de octava [35].

Centros de banda de Octavas, 1/3 y 1/12 de octavas (Normalizados)			Legenda
16 Hz	250 Hz	4000 Hz	Octavas
17 Hz	265 Hz	4250 Hz	Tercios de oct. (1/3)
18 Hz	280 Hz	4500 Hz	Doceavos de oct. (1/12)
19 Hz	300 Hz	4750 Hz	
20 Hz	315 Hz	5000 Hz	
21,2 Hz	335 Hz	5300 Hz	
22,4 Hz	355 Hz	5600 Hz	
23,6 Hz	375 Hz	6000 Hz	
25 Hz	400 Hz	6300 Hz	
26,5 Hz	425 Hz	6700 Hz	
28 Hz	450 Hz	7100 Hz	
30 Hz	475 Hz	7500 Hz	
31,5 Hz	500 Hz	8000 Hz	
33,5 Hz	530 Hz	8500 Hz	
35,5 Hz	560 Hz	9000 Hz	
37,5 Hz	600 Hz	9500 Hz	
40 Hz	630 Hz	10000 Hz	
42,5 Hz	670 Hz	10600 Hz	
45 Hz	710 Hz	11200 Hz	
47,5 Hz	750 Hz	11800 Hz	
50 Hz	800 Hz	12500 Hz	
53 Hz	850 Hz	13200 Hz	
56 Hz	900 Hz	14000 Hz	
60 Hz	950 Hz	15000 Hz	
63 Hz	1000 Hz	16000 Hz	
67 Hz	1060 Hz	17000 Hz	
71 Hz	1120 Hz	18000 Hz	
75 Hz	1180 Hz	19000 Hz	
80 Hz	1250 Hz	20000 Hz	
85 Hz	1320 Hz	21200 Hz	
90 Hz	1400 Hz	22400 Hz	
95 Hz	1500 Hz	23600 Hz	
100 Hz	1600 Hz		
106 Hz	1700 Hz		
112 Hz	1800 Hz		
118 Hz	1900 Hz		
125 Hz	2000 Hz		
132 Hz	2120 Hz		
140 Hz	2240 Hz		
150 Hz	2360 Hz		
160 Hz	2500 Hz		
170 Hz	2650 Hz		
180 Hz	2800 Hz		
190 Hz	3000 Hz		
200 Hz	3150 Hz		
212 Hz	3350 Hz		
224 Hz	3550 Hz		
236 Hz	3750 Hz		

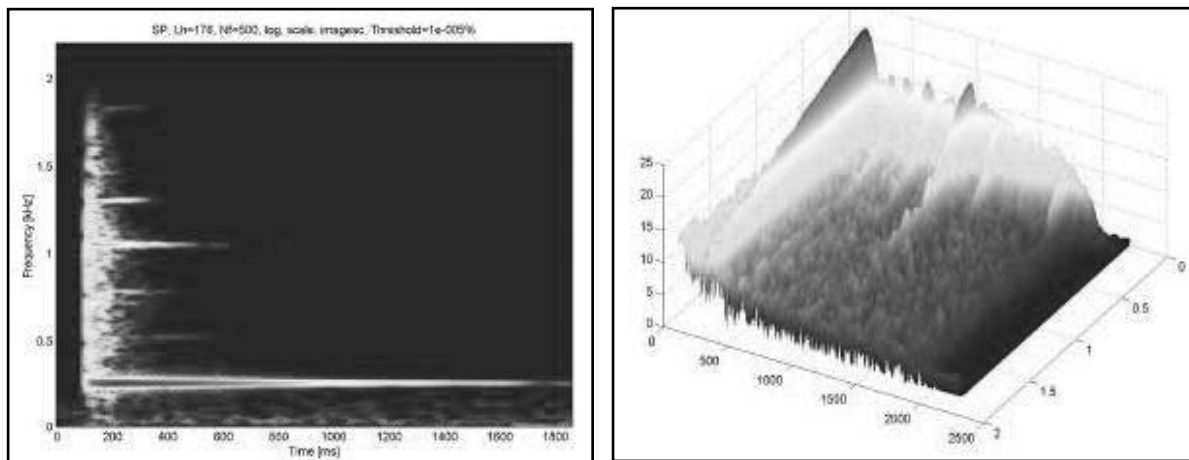
**Tabla I.A.6.** Valores de los centros de las bandas de octavas, 1/3 de octavas y 1/12 de octavas normalizadas (ISO).

### 7.3. Espectrograma

A la hora de analizar la evolución temporal del contenido armónico de un sonido, se funden, por un lado, el concepto de espectro acústico, que señala las intensidades de sus distintas componentes frecuenciales con el concepto de forma de onda, donde se refleja las variaciones de amplitud de la señal en el tiempo. Estudiar este aspecto resulta especialmente relevante para comprender la conformación del timbre característico de cada instrumento.

A la forma de representar el contenido espectral a lo largo del tiempo se le denomina espectrograma, el cual puede presentarse en dos o tres dimensiones, siendo el color el indicativo de la potencia relativa de la intensidad de cada componente frecuencial en juego. En los espectrogramas a color, las tonalidades cercanas al rojo muestran los máximos de intensidad, mientras que en los representados en escala de grises lo hacen las tonalidades más oscuras.

A continuación, se presentan los espectrogramas en 2D y 3D de la nota Do4=261 Hz tocada por una marimba.



**Figura I.A.34.** Espectrogramas de la nota Do4 tocada por una marimba. Representación en 2D (izquierda) y en 3D (derecha)



## I.B. ACÚSTICA DE RECINTOS

### 1. Campo directo y campo reverberante

“La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de ella llega de forma directa (sonido directo) como si fuente y receptor estuviesen en condiciones de espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado) al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las distintas superficies del recinto” [13].

“La energía del sonido directo obedece únicamente a la distancia entre fuente sonora y oyente, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. Cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones” [13].

La presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente) y del sonido reflejado (se mantiene prácticamente constante).

$$SPL_{TOTAL} = SPL_{DIRECTO} \oplus SPL_{REVERBERANTE}$$

A la zona donde prevalece el sonido directo se le denomina *zona de campo directo* y a la aquella en donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de *zona de campo reverberante*.

#### 1.1. D/R Ratio

Al parámetro que relaciona el sonido directo y el reverberante se conoce como **D/R Ratio**. Este muestra la proporción de sonido directo frente al reverberante en términos de dB.

$$D/R \text{ Ratio (dB)} \left\{ \begin{array}{l} > 0 \rightarrow SPL_D > SPL_R \\ = 0 \rightarrow SPL_D = SPL_R \\ < 0 \rightarrow SPL_D < SPL_R \end{array} \right.$$

## 1.2. Distancia crítica y distancia límite

La **distancia crítica** es aquella para la cual la intensidad del campo directo es igual a la del campo reverberante y viene dada por la expresión:

$$D_c = 0,14 \sqrt{Q R}$$

donde:

Q = factor de directividad de la fuente en la dirección considerada.

R = constante de la sala.

$$R = \frac{S_t \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} [m^2]$$

siendo:

$S_t$  = superficie total de la sala (en m<sup>2</sup>).

$\bar{\alpha}$  = coeficiente medio de absorción de la sala.

La **distancia límite** es aquella para la cual el nivel del sonido directo es 10 dB menor que el nivel del sonido reverberante y se calcula según la expresión:

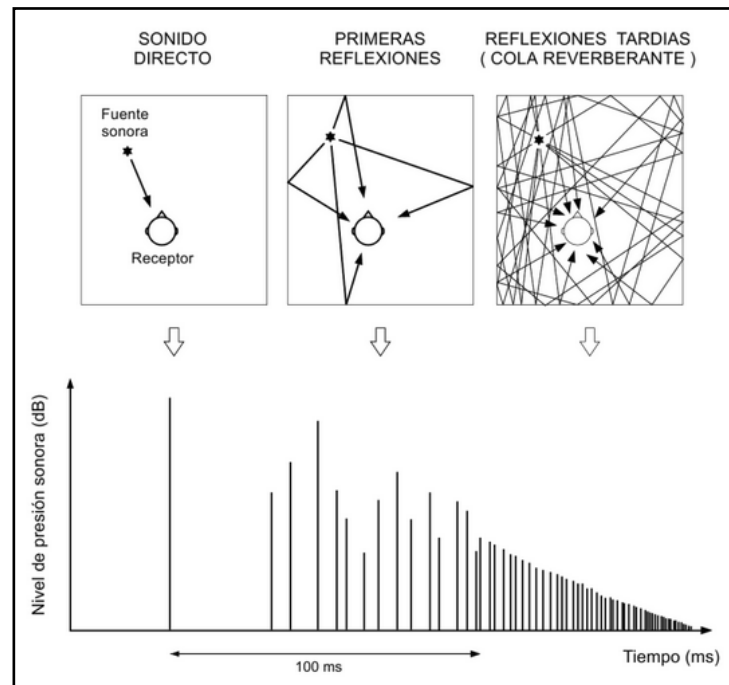
$$D_L = 3,16 \cdot D_c$$

## 2. El sonido reflejado

“Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas, y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la cola reverberante” [13].

“Las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (orden  $\leq 3$ ). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor” [13]. “Se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto dependiendo de la forma y del volumen del recinto” [13].

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente se denomina **reflectograma**. En la **figura I.B.1** se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el reflectograma asociado.

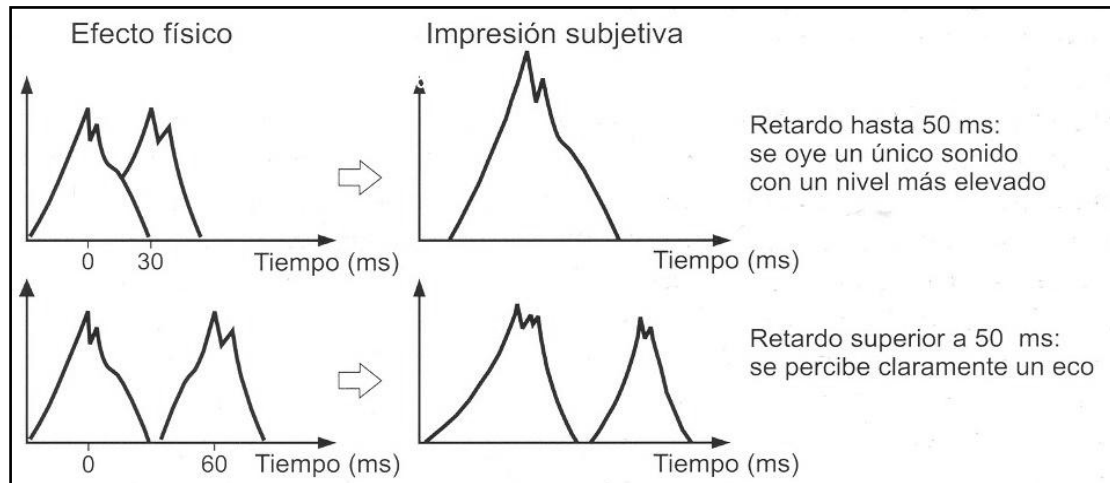


**Figura I.B.1.** Reflectograma [13].

## 2.1. El efecto subjetivo de las primeras reflexiones

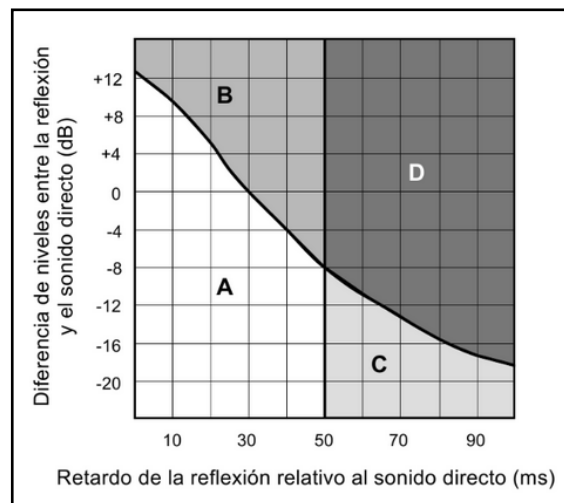
La llegada de las primeras reflexiones contribuye al aumento de la energía sonora que alcanza a un oyente situado en un punto de la sala. No obstante, según la relación que exista entre el tiempo de retardo de la reflexión y su nivel relativo al sonido directo, la contribución que hace la reflexión o reflexiones a la calidad acústica del sonido total percibido puede no ser siempre positiva.

Tal y como ilustra la **figura I.B.2**, pueden ocurrir dos situaciones: el sonido directo y la reflexión están separadas por un corto intervalo de tiempo de tal manera que el oído integra ambos sonidos y construye una impresión subjetiva de sonido final con mayor nivel, o bien estos son percibidos como dos entidades independientes.



**Figura I.B.2.** Efecto subjetivo de las primeras reflexiones [13].

En la siguiente gráfica (**figura I.B.3**) se representan los cuatro escenarios posibles dependiendo de la diferencia de niveles (en dB) entre la reflexión y el sonido directo y el retardo existente entre ambos (en ms).



**Figura I.B.3.** Relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra (zonas características) [13].

- **Zona A:** Las reflexiones pueden considerarse favorables y mejoran la calidad acústica del sonido directo en cuanto a inteligibilidad y sonoridad.
- **Zona B:** Las reflexiones a pesar de llegar pronto al oyente tienen un nivel elevado, y por tanto producen un efecto de desplazamiento de la localización de la fuente sonora (precedencia o *image-shift*).
- **Zona C:** La reflexión, aunque en algunos casos sea distinguible de la señal directa, no es perjudicial para la inteligibilidad ya que su nivel es muy bajo.

- **Zona D:** La reflexión llega de forma tardía pero con un nivel lo suficientemente elevado como para producir la percepción de un eco que resulta molesto, lo cual se traduce en una disminución de la inteligibilidad.

El criterio que se emplea para determinar si un eco es molesto o no es el criterio de Doak & Bolt que aparece descrito en la siguiente figura:

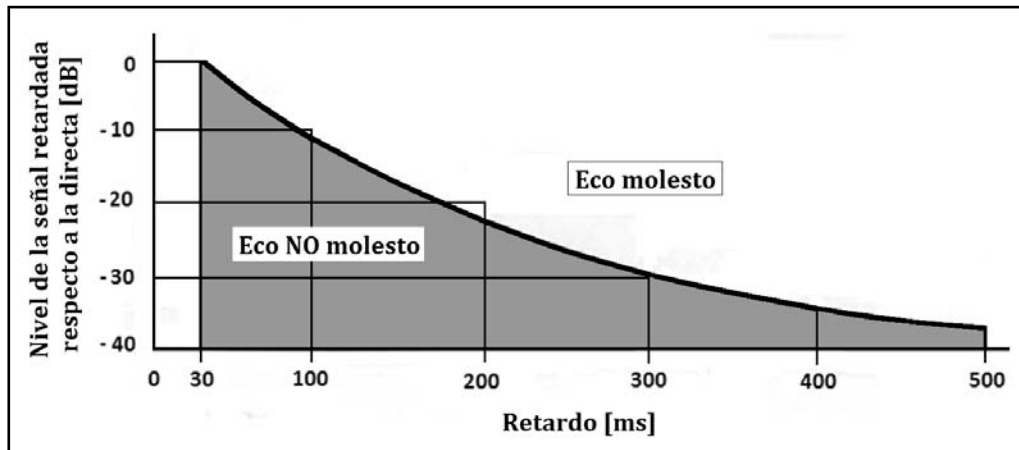


Figura I.B.4. Gráfica del criterio de Doak & Bolt para ecos.

### 3. El sonido absorbido

#### 3.1. Absorción en el aire

Hasta el momento, en los apartados precedentes, se ha considerado que la propagación de las ondas sonoras en el medio se realizaba sin que éste introdujera pérdidas en la energía. En realidad, estas pérdidas existen y son debidas principalmente al proceso de compresión y rarefacción que sufre el medio debido a la acción de la onda sonora. Una pequeña fracción de la energía se disipa en forma de calor, aumentando estas pérdidas proporcionalmente con el cuadrado de la frecuencia.

La absorción del aire ( $A_{\text{aire}}$ ) dentro de un recinto se determina siguiendo esta expresión:

$$A_{\text{aire}} = 4 \cdot m \cdot V [\text{Sabines}]$$

donde:

$m$  = constante de absorción de intensidad acústica.

$V$  = volumen de la sala.

## 3.2. Absorción en los materiales

### 3.2.1. Coeficiente de absorción ( $\alpha$ )

El grado de absorción del sonido de un material se representa mediante el llamado coeficiente de absorción ( $\alpha$ ). Relaciona la cantidad de la energía sonora incidente con la que es absorbida por las superficies del recinto:

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

### 3.2.2. Absorción (A)

La absorción de un material se obtiene multiplicando su coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) por su superficie (S). La unidad de absorción es el Sabine (1 Sabine corresponde a la absorción de 1 m<sup>2</sup> de ventana abierta).

$$A = \alpha \cdot S$$

Para calcular la absorción total de una sala hay que sumar las absorciones individuales de las diversas superficies que encierran el volumen.

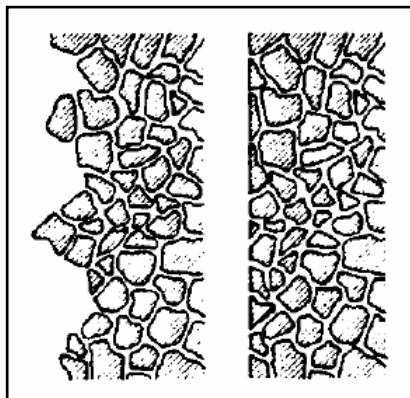
$$A_{tot} = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n \quad (\text{Sabines})$$

### 3.2.3. Clasificación de los materiales y sistemas acústicos absorbentes

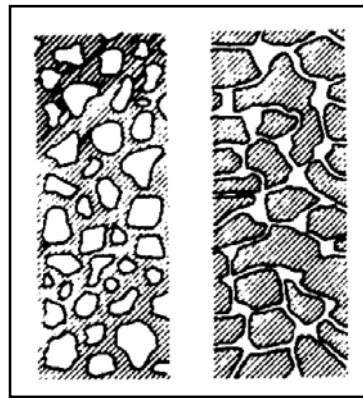
Los materiales porosos se caracterizan por ser buenos absorbentes sobre todo en altas frecuencias, mientras que los sistemas acústicos elásticos y resonantes están destinados a una absorción selectiva en frecuencia, fundamentalmente a las medias y bajas frecuencias.

#### 3.2.3.1. Materiales absorbentes porosos

Están formados por una estructura alveolar y fibrosa que actúan por degradación de la energía sonora en calor debido al rozamiento del aire en el interior de sus cavidades. Algunos ejemplos de materiales porosos son la lana de vidrio, el corcho o la lana de roca.

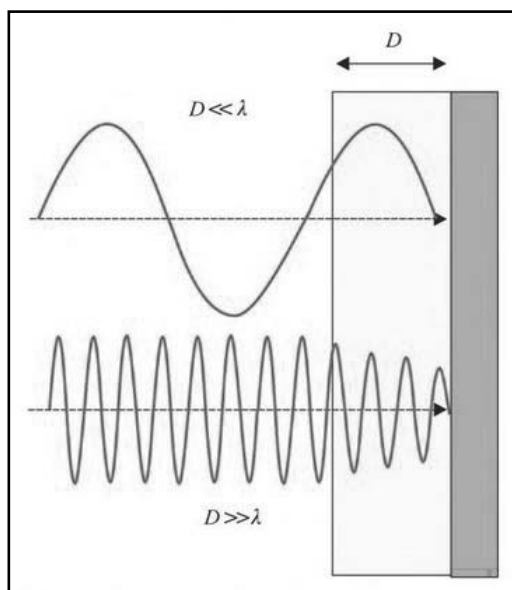


**Figura I.B.5.** Estructura de los materiales porosos. Estos pueden tener una superficie rugosa (izquierda) o lisa (derecha).



**Figura I.B.6.** Estructura de los materiales porosos. Estos pueden poseer poros cerrados interiores (izquierda) o abiertos exteriores interconectados (derecha).

La absorción producida por el material se incrementa a medida que la frecuencia de la señal sonora aumenta, tal y como se refleja en la **figura I.B.7**: la absorción es baja a todas aquellas frecuencias para las que se cumple que el espesor ( $D$ ) del material es mucho menor que la longitud de onda del sonido dentro del material ( $D \ll \lambda$ ).



**Figura I.B.7.** Principio de funcionamiento de la absorción en un material [24].

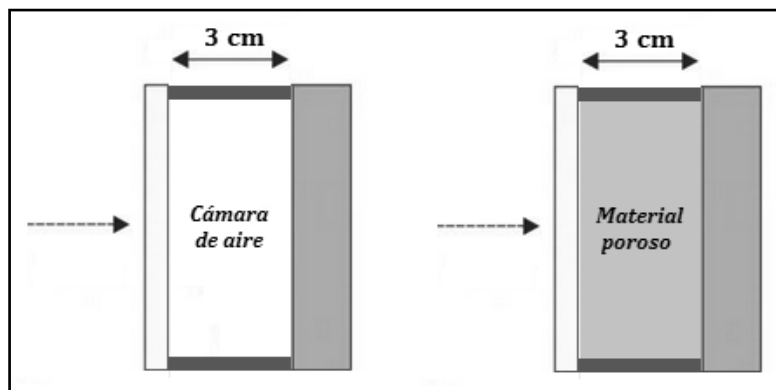
### 3.2.3.2. Sistemas absorbentes por elasticidad

Cuando se sitúa una lámina de 'M' Kg/m<sup>2</sup> a una distancia 'd' de una pared rígida, el sistema compliant hace que se produzca una absorción máxima a la siguiente frecuencia:

$$f \cong \frac{600}{\sqrt{M \left(\frac{kg}{m^2}\right) \cdot d (cm)}}$$

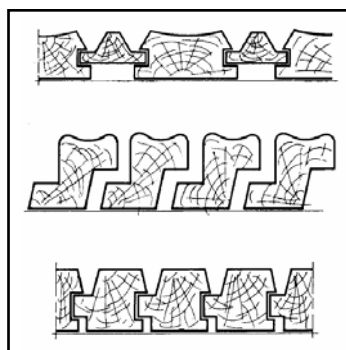
A las frecuencias que no son la de resonancia el comportamiento de estos materiales es poco absorbente, por lo que podrían ser utilizados como difusores para esas componentes espectrales.

A continuación, en la **figura I.B.8**, se observa un ejemplo de sistema acústico absorbente por elasticidad: un panel de contrachapado de 3 mm de grosor se coloca sujeto a una pared rígida mediante una fijación de tipo elástico dejando una cámara de aire de 3 cm. Existe la posibilidad de aumentar la absorción a la frecuencia de resonancia introduciendo materiales porosos en la cavidad.



**Figura I.B.8.** Sistema acústico absorbente por elasticidad.

Gran parte de los elementos constructivos que permiten la instalación de sistemas compliant tienen forma de machi-hembrados (**figura I.B.9**).

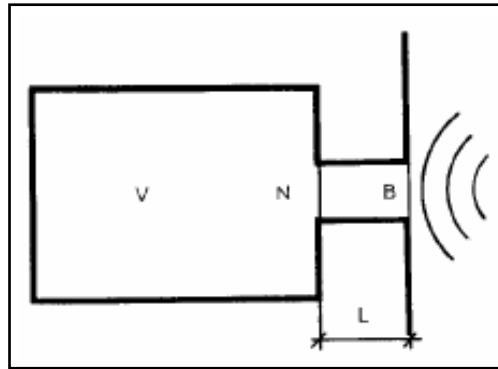


**Figura I.B.9.** Machi-hembrados.



### 3.2.3.3. Sistemas absorbentes por resonancia

Estos sistemas acústicos son absorbentes selectivos en frecuencia y están basados en el principio del resonador de Helmholtz (**figura I.B.10**). Presentan una gran absorción en una banda estrecha de frecuencias alrededor de una frecuencia de resonancia ( $f_0$ ), para la cual la absorción es máxima.

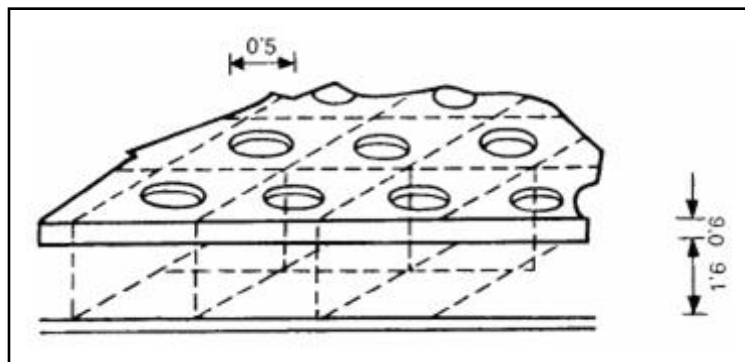


**Figura I.B.10.** Resonador de Helmholtz.

Se puede demostrar que la absorción máxima que podría presentar un resonador de este tipo es de:

$$A = \frac{\lambda^2}{2\pi}$$

Los materiales resonadores más característicos que siguen este principio de funcionamiento son los paneles perforados, ilustrados en la siguiente figura:



**Figura I.B.11.** Paneles perforados.

## 4. Parámetros acústicos de una sala

La caracterización de un recinto vendrá definida por los valores de una serie de parámetros acústicos que indican la respuesta de la sala ante los sonidos que se produzcan en su interior.

### 4.1. Tiempo de reverberación, $TR_{60}$

A la permanencia del sonido aún después de haberse detenido la emisión de la fuente sonora se le denomina reverberación. Para cuantificar la duración de este proceso de extinción del sonido se introduce el concepto de tiempo de reverberación.

Se define, a una frecuencia determinada, como “el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco sonoro interrumpe su emisión hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial” [13].

Por lo general, el tiempo de reverberación varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que esta 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 que se manifiesta especialmente en recintos grandes y a altas frecuencias.

#### 4.1.1. Tiempo de reverberación óptimo, $TR_{mid}$

Es el tiempo de reverberación que permite una adecuada distribución entre el nivel del sonido directo y el reverberante en el interior del recinto que estemos diseñando. Consiste en la media aritmética entre el tiempo de reverberación a 500 Hz y a 1 kHz:

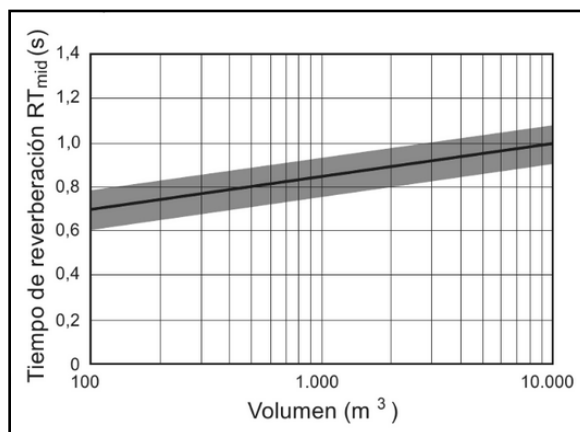
$$TR_{mid} = \frac{TR(500\text{ Hz}) + TR(1\text{ KHz})}{2}$$

En la **tabla I.B.1** se exponen los diferentes valores de  $TR_{mid}$  recomendados dependiendo del tipo de recinto.

Tipo de sala	TR <sub>mid</sub> , con sala ocupada (en s)
Locutorio de radio	0,2 - 0,4
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	1,0 - 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 coral)	2,0 - 3,0

**Tabla I.B.1.** TR<sub>mid</sub> recomendado en función del tipo de sala [13].

Este parámetro también depende del volumen del recinto. Como se observa en la anterior tabla, para una sala de conferencia ocupada el TR<sub>mid</sub> aconsejado se encuentra en el intervalo 0,7 s - 1 s. En la **figura I.B.12** se muestra como para salas de conferencias pequeñas el valor de su TR<sub>mid</sub> debe estar cercano a los 0,7 s, mientras que si es muy grande este debe estar más próximo a 1 s.



**Figura I.B.12.** TR<sub>mid</sub> recomendado en función del volumen del recinto. Sala de conferencia ocupada [13].

#### 4.1.2. Cálculo del TR

Este parámetro puede representarse por medio de la **fórmula de Sabine**:

$$TR [s] = \frac{0,161 \cdot V}{A}$$

donde:

V = volumen de la sala en m<sup>3</sup>.

A = absorción total de los materiales, definida por:

$$A = \bar{\alpha} \cdot S_t$$

siendo:

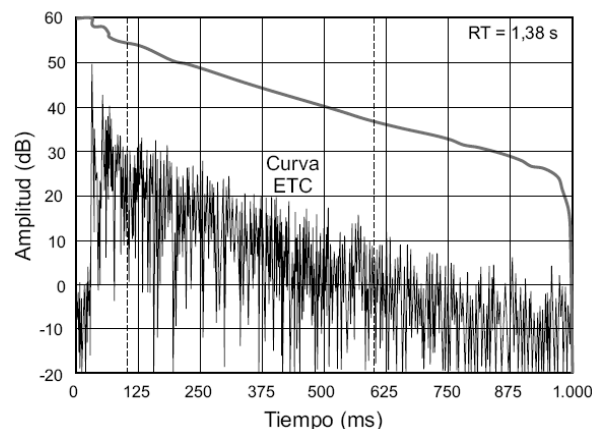
$\bar{\alpha}$  = coeficiente de absorción sonora.

$S_t$  = área de superficie interior total expresada en m<sup>2</sup>.

#### 4.1.3. Medida del TR

El tiempo de reverberación se calcula a partir de la curva de decaimiento energético, medida en un punto cualquiera de una sala. Esta curva puede obtenerse como respuesta a la emisión de un sonido breve e intenso o, actualmente, mediante técnicas TDS o MLS, en cuyo caso se denomina ETC (*Energy Time Curve*) [13].

En el caso de que no sea posible observar una caída de 60 dB como consecuencia de la falta de margen dinámico, es el usuario quien fija los instantes inicial y final de la caída, a partir de los cuales el sistema calcula automáticamente el TR. Así, es común encontrar el tiempo de reverberación expresado con las referencias TR<sub>10</sub>, TR<sub>20</sub> o TR<sub>30</sub>.



**Figura I.B.13.** Curva ETC y curva usada para el cálculo del TR obtenida mediante la integración de la ETC (aplicando el método de Schroeder) [13].

La manera práctica de obtener el valor del TR representativo de una sala, a cada de frecuencia de trabajo, consiste en promediar los valores medidos en diferentes puntos de la misma (habitualmente entre 10 y 15 puntos, según su volumen).

#### 4.2. Parámetros de inteligibilidad

La inteligibilidad mide la calidad sonora de la información verbal en un entorno determinado. Por medio de la inteligibilidad de la palabra se puede cuantificar, en términos porcentuales, la cantidad del mensaje oral que es correctamente recibido por el receptor.

Los factores que afectan a esta medida son el ruido de fondo, el tiempo de reverberación, el volumen del recinto y su geometría, además de la existencia de superficies absorbentes y reflectantes del sonido. Por lo general, cuanto más corto sea el tiempo de reverberación mejor será la inteligibilidad.

### 4.2.1. Pérdida de articulación de las consonantes, %ALCons

Este parámetro se basa en la mayor contribución de las consonantes en la inteligibilidad de la palabra frente a la de las vocales. Las consonantes conforman la información de altas frecuencias y las vocales la de bajas frecuencias.

Peutz estableció que el índice de %ALCons (*Articulation Loss of Consonants*) en un punto de la sala se determina según la siguiente expresión:

$$\% \text{ALCons} = \frac{200 \cdot r^2 \cdot TR^2}{V \cdot Q} \text{ si } r \leq 3,16 \cdot D_c$$

donde:

r = distancia entre la fuente sonora y el punto de escucha.

TR = tiempo de reverberación.

V = volumen de la sala.

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada (aproximadamente 2 para la voz humana).

D<sub>c</sub> = distancia crítica.

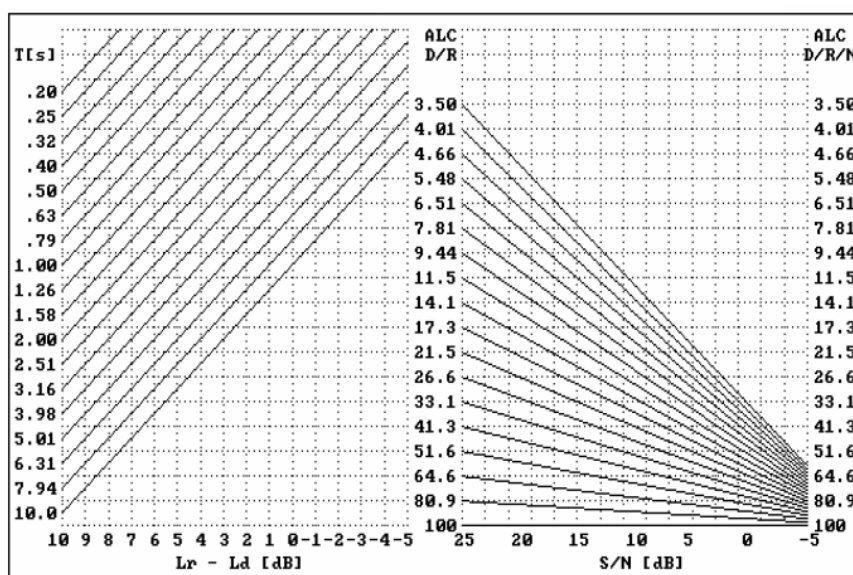


Figura I.B.14. Gráfica de Peutz para el cálculo del %ALCons [13].

Como se observa en la **figura I.B.14**, siempre que la relación señal a ruido sea superior a 25 dB se puede determinar el %ALCons calculando el tiempo de reverberación del recinto y la diferencia de niveles entre el sonido directo y el reverberante,  $L_D - L_R$ . Esta diferencia de niveles se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L_D - L_R = 10 \cdot \log\left(\frac{Q \cdot R}{r^2}\right) - 17 \text{ dB}$$

Por otro lado, si la distancia entre la fuente sonora y el oyente provoca que el nivel del sonido directo sea 10 dB menor que el nivel del sonido reverberante, el %ALCons permanece constante y con un valor aproximado de:

$$\% \text{ALCons} = 9 \cdot TR$$

Una vez obtenidos los valores de %ALCons se evaluará la inteligibilidad siguiendo las orientaciones de la **tabla I.B.2**:

%ALCons	Valoración subjetiva
0% - 3%	Excelente
3% - 7%	Buena
7% - 15%	Regular
15% - 33%	Pobre
> 33%	Mala

**Tabla I.B.2.** Valoración teórica del %ALCons [24].

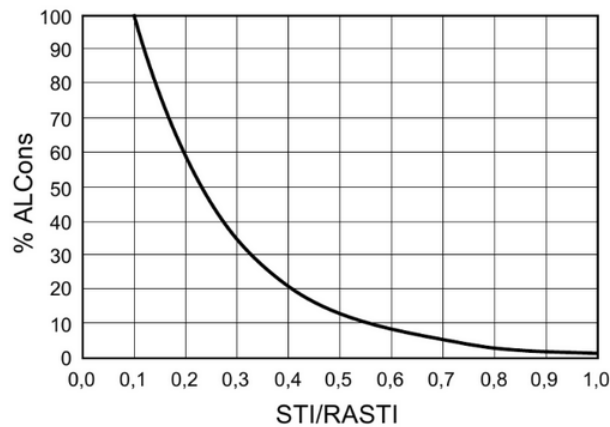
#### 4.2.2. STI y RaSTI

El STI (*Speech Transmission Index*) o RaSTI (*Rapid Speech Transmission Index*) en su versión simplificada, permite valorar la inteligibilidad de la palabra entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). Estos índices se relacionan con la inteligibilidad del discurso según la siguiente tabla:

STI o RaSTI	Valoración subjetiva
0,75 - 1	Excelente
0,6 - 0,75	Buena
0,45 - 0,6	Regular
0,3 - 0,45	Pobre
0 - 0,3	Mala

**Tabla I.B.3.** Valoración teórica del STI y del RaSTI [24].

%ALCons y STI/RaSTI se relacionan como se muestra en la **figura I.B.15**:



**Figura I.B.15.** Relación entre el %ALCons y el STI/RaSTI [13].

### 4.3. Parámetros de energía

Este tipo de parámetros aporta información sobre la distribución energética durante el tiempo que dura un proceso sonoro en un punto del recinto. Los parámetros de energía más relevantes son: la definición ( $D_{50}$ ), la claridad de la voz ( $C_{50}$ ), la claridad musical ( $C_{80}$ ) y el *Early Decay Time* (EDT).

#### 4.3.1. Definición, $D_{50}$

Según R. Thiele, la definición es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluyendo el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo [13]. Se calcula en cada banda de frecuencias, entre 125 Hz y 4 KHz:

$$D = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía total}}$$

El valor de dicho parámetro para cada punto de un recinto ocupado y en cada banda de frecuencias debe cumplir:

$$D > 0,5$$

Cuanto más elevado sea dicho valor mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado de la sala.

### 4.3.2. Claridad de la voz, $C_{50}$

Se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluyendo el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 50 ms [13]. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 KHz. El  $C_{50}$  se expresa en escala logarítmica (dB):

$$C_{50} [dB] = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía a partir de 50 ms}}$$

Según L. G. Marshall, el valor representativo del  $C_{50}$  se calcula como la media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz y 4 KHz, y recibe el nombre de *speech average*. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25% respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra:

$$C_{50} = 0,15 \cdot C_{50} (500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50} (1 \text{ KHz}) + 0,35 \cdot C_{50} (2 \text{ KHz}) + 0,25 \cdot C_{50} (4 \text{ KHz})$$

El valor recomendado correspondiente a cada punto de una sala ocupada debe verificar:

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

Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado.

### 4.3.3. Claridad musical, $C_{80}$

Según Cremer, la claridad musical se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 80 ms, calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz [13]. Se expresa en escala logarítmica (dB):

$$C_{80} [dB] = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía a partir de 80 ms}}$$

La elección del intervalo temporal de 80 ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones (reflexiones tempranas) que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical.



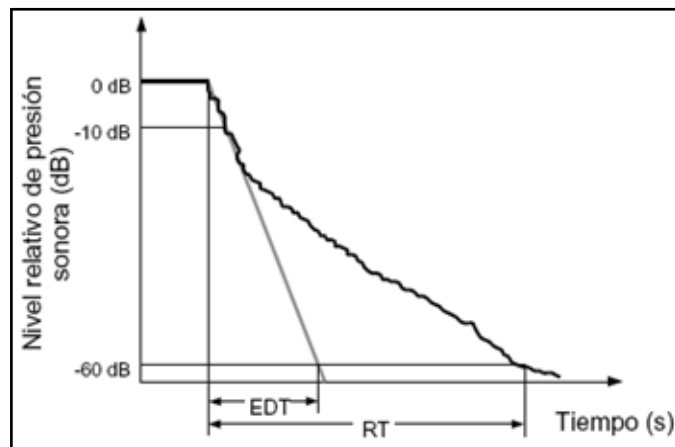
Según Hidaka, este parámetro en teatros debe cumplir:

$$1 \text{ dB} < C_{80} > 3 \text{ dB}$$

La claridad musical está estrechamente relacionada con el tiempo de reverberación. Generalmente, esta aumenta según disminuye el volumen del recinto.

#### 4.3.4. Early Decay Time, EDT

El EDT se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB.



**Figura I.B.16.** Relación entre el EDT y el TR [13].

Este parámetro está estrechamente relacionado con el tiempo de reverberación (TR), con la salvedad de que el EDT mide la reverberación percibida (subjetiva) y el TR la reverberación real (objetiva). Los valores de EDT y TR pueden ser significativamente diferentes. No obstante, si se quiere lograr una difusión uniforme del sonido en el interior de una sala ocupada, se debe cumplir que:

$$EDT_{mid} \approx TR_{mid}$$

El  $EDT_{mid}$  se calcula realizando la media aritmética entre los valores obtenidos a las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz con la sala vacía.

#### 4.4. Otros parámetros

Además de los parámetros acústicos mencionados en los anteriores apartados, existen otros que, si bien no han sido considerados de gran relevancia a la hora de abordar el estudio del Auditorio, sus valores son proporcionados por el *software* Dirac y están detallados para cada posición de medida en el **Anexo II.A**.

##### 4.4.1. Impulse Noise Ratio, INR

El INR es definido como [36]:

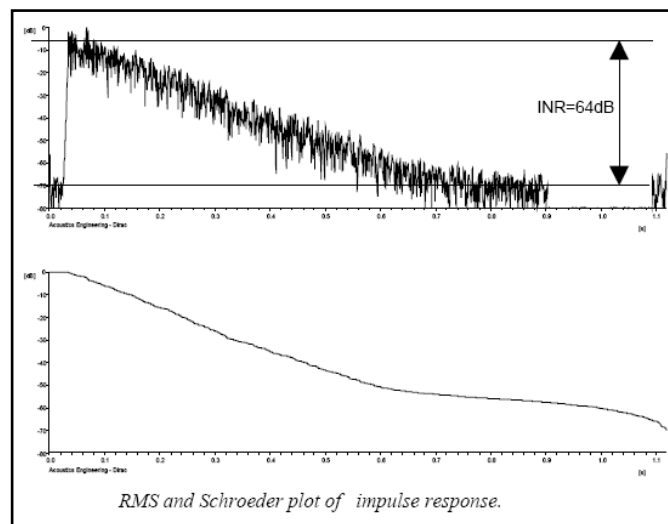
$$INR [dB] = L_I - L_N$$

donde:

$L_I$  = nivel RMS máximo de la potencia en dB.

$L_N$  = nivel de ruido en dB.

Para definir  $L_I$  se utiliza el método de integración de Schroeder empleado para el cálculo del TR. En otras palabras,  $L_I$  es definido como el nivel de la energía de la respuesta al impulso total normalizada al tiempo de decaimiento  $TR_{60}$ .



**Figura I.B.17.** Gráficas del RMS de la respuesta impulsiva y de la curva obtenida por el método de integración de Schroeder [36].

En resumen, el INR es un parámetro caracterizador de la respuesta al impulso que está estrechamente relacionado con el rango de caída mencionado en la norma ISO 3382, el cual debe tener un valor de 35 y 45 dB para las medidas del  $TR_{20}$  y el  $TR_{30}$  respectivamente.

#### 4.4.2. Ganancia acústica, G

Relación entre la ganancia en un punto del recinto comparada con la que habría a una distancia de 10 metros empleando una radiación omnidireccional en condiciones de espacio libre.

#### 4.4.3. Tiempo central, $t_s$

Según Kürer este parámetro es indicativo de la “distancia” (en ms) desde el origen temporal  $t = 0$  hasta el “centro de gravedad” del área de la curva de decaimiento [13], en base a la siguiente expresión:

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

Los valores de  $t_s$  correspondientes a un decaimiento energético puramente exponencial dependen del tiempo de reverberación. Suponiendo que los valores de RT se hallan situados entre 1 y 2 s, los valores esperados de  $t_s$  se encuentran dentro del siguiente margen:

$$72 \text{ ms} \leq t_s \leq 144 \text{ ms}$$

El parámetro  $t_s$  es indicativo de la nitidez del sonido en puntos específicos de la sala y está altamente relacionado con el EDT. Cuanto mayor sea  $t_s$  menor será la nitidez obtenida en el punto en cuestión. En la práctica, su uso es muy reducido. Su valor suele estar en torno a los 100 ms para auditorios.

#### 4.4.4. STAGE

Los parámetros de escenario son medidas relacionadas con el sonido que llega a los músicos situados en el mismo. Se coloca una fuente omnidireccional sobre el escenario y un micrófono ubicado a 1 metro de la fuente [37].

- **STearly (Early Support):** proporción de energía sonora tardía-temprana que llega, donde se considera energía tardía a la recibida entre 20 y 100 ms y energía temprana a la producida durante los 10 primeros ms. Según la norma ISO 3382-1 para música sinfónica son recomendables valores de  $ST_{\text{early}}$  mayores a -13 dB.

$$ST_{\text{early}} [dB] = \frac{E_{20-100}}{E_{0-10}}$$

- **STlate (Late Support):** proporción de energía sonora tardía-temprana que llega, cuando la energía tardía es la que llega después de 100 ms y la temprana la correspondiente a los primeros 10 ms.

$$ST_{late} [dB] = \frac{E_{100-1000}}{E_{0-10}}$$

- **STtotal (Total Support):** proporción de energía sonora tardía-temprana que llega, suponiendo como tardía la energía recibida después de 20 ms y temprana a la existente durante los 10 primeros ms. Según la norma ISO 3382-1 para música sinfónica son recomendables valores de  $ST_{total}$  mayores a -12 dB.

$$ST_{total} [dB] = \frac{E_{20-1000}}{E_{0-10}}$$

#### 4.4.5. Weight

MTI (*Modulation Transfer Index*) con ponderación espectral A.

#### 4.4.6. STI female/male

El STI female está basado en un espectro de frecuencia de voz estándar femenino, así como el STI male está basado en un espectro de frecuencia de voz estándar masculino [38]. Los parámetros de inteligibilidad femeninos excluyen la banda de frecuencias de 125 Hz.

#### 4.4.7. STIPA female/male

El *Speech Transmission Index for Public Address systems* es una versión simplificada del STI desarrollada para reducir el tiempo empleado en la medida y en el cálculo del resultado final [38]. En el *software* Dirac, donde el STI es medido a través de respuestas impulsivas en vez de ruido modulado, el STIPA no presenta ventajas sobre el STI en lo que concierne a la medida o el tiempo de cómputo, pero se propone su cálculo para hacer comparaciones con otros valores de STIPA medidos.

#### 4.4.8. STITEL

Igual que STIPA, el *Speech Transmission Index for Telecommunication systems* fue pensado para reducir el tiempo de cálculo del STI, pero esta vez sobre sistemas de telecomunicación [38].

#### **4.4.9. Signal to Noise Ratio, SNR**

Es la relación logarítmica entre el nivel de señal y el nivel de ruido de fondo [38]. Durante la medida en una sala deben ser evitados los cambios de temperatura, movimientos de aire o de personas para que este parámetro sea óptimo, es decir, tenga un valor lo más alto posible.



# I.C. ACÚSTICA DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES

## 1. Clasificación de los instrumentos musicales

Los primeros intentos conocidos en Europa para clasificar los diversos instrumentos musicales datan de: Sebastián Virdung, en 1511 y Martín Agrícola, en 1528. A lo largo de los siglos hasta hoy en día han surgido numerosas clasificaciones, unas más conocidas y aceptadas que otras, siguiendo cada una de ellas sus propios criterios de diferenciación. A continuación se exponen tres de las principales clasificaciones empleadas en la actualidad.

### 1.1. Sistemas acústicos simples y acoplados

La clasificación más elemental que puede realizarse es la que se establece entre los instrumentos que son en sí mismos una auténtica sustancia sonora que propaga vibraciones directamente a nuestros oídos a través del aire y, por otro lado, aquellos que tienen una fuente sonora primaria que propaga las vibraciones indirectamente por medio de un resonador secundario.

A los instrumentos englobados en el primer caso se les denominan idiófonos o autorresonadores y constituyen un sistema acústico simple. La sustancia sonora es su propia fuente de vibración, que, en un solo acto, recibe y transmite la energía acústica. Los gongs y las cajas chinas son algunos ejemplos de idiófonos.

En el segundo caso, las vibraciones se excitan en una fuente que no es suficiente por sí misma, y por tanto necesita el apoyo y la colaboración resonante de una estructura asociada, como la caja del violín o la columna de aire de la flauta, formando ambos elementos un sistema acústico acoplado.

### 1.2. Clasificación de Sachs-Hornbostel

Los etnomusicólogos Curt Sachs y Erich Hornbostel anunciaron en 1914 el sistema de clasificación de instrumentos musicales conocido como Sachs-Hornbostel, fundamentado en el sistema creado por Victor Mahillon a finales del s. XIX.

El sistema Sachs-Hornbostel se caracteriza por ser muy preciso y por pretender en él englobar a todos los instrumentos de cualquier cultura. Tiene la ventaja ser abierto, lo cual

facilita la inclusión de nuevas categorías. No tardó en ser admitido universalmente y es uno de los más valorados en la actualidad.

Formalmente este se fundamenta en la clasificación decimal de Dewey. Posee cuatro niveles superiores de clasificación, con varios subniveles, sumando en total más de 300 categorías [26].

El primer nivel de esta clasificación organológica viene dado por el elemento vibrante que produce el sonido. Por consiguiente, los instrumentos se clasifican en:

1. **Idiófonos.** Son aquellos instrumentos musicales en los cuales el mismo cuerpo del instrumento es la fuente primaria del sonido.
2. **Membranófonos.** El elemento que produce el sonido es una membrana en tensión.
3. **Cordófonos.** El sonido en estos instrumentos es producido por la vibración de una o varias cuerdas en tensión.
4. **Aerófonos.** Estos instrumentos utilizan el aire como fuente de sonido.
5. **Electrófonos.** Aquellos en los que la producción del sonido se realiza por medios electrónicos mediante circuitos eléctricos.

Como se ha señalado anteriormente este sistema de categorización es bastante complejo, existiendo numerosos subgrupos de clasificación que atienden a diferentes aspectos de la construcción del instrumento así como de su forma de interpretarlo.

El piano, que es el instrumento protagonista en este Proyecto, se clasifica dentro de la categoría 314.122 [39].

<b>Categorización del piano según el sistema Sachs-Hornbostel</b>	
<b>3</b>	<b>Cordófono</b>
<b>31</b>	Cordófono simple (o cítara)
<b>314</b>	Cordófono simple con teclado
<b>314.1</b>	Verdadero cordófono simple con teclado
<b>314.12</b>	Verdadero cordófono simple con teclado y con resonador
<b>314.122</b>	Verdadero cordófono simple con teclado y caja de resonancia como resonador.

**Tabla I.C.1.** Clasificación del piano según Sachs-Hornbostel.



### 1.3. Clasificación clásica o tradicional

Sobre la base de una larga tradición los músicos utilizan una clasificación más sencilla, en la que se identifican cuatro grandes grupos o familias de instrumentos: cuerda, viento, percusión y electrónicos. En lo referente a la música clásica, el grupo de los electrónicos queda excluido, ya que el mecanismo de funcionamiento de estos instrumentos implica otros parámetros y técnicas no puramente acústicas.

Esta clasificación, a pesar de no ser muy precisa o lógica puesto que los instrumentos de las diferentes familias se agrupan siguiendo diferentes criterios en cada una de ellas, es la más conocida y usada de todas.

Otros autores, dentro de la clasificación tradicional, tratan a los instrumentos de teclado como una categoría independiente. Dentro de ella se incluyen instrumentos de cuerda (piano, clave, etc.), de viento (órgano, acordeón, etc.) y electrófonos (sintetizadores, pianos eléctrico, etc.); todos ellos con la característica común de que poseen un teclado.

A continuación, en la **tabla I.C.2**, se expone la categorización clásica o tradicional en 3 familias de instrumentos (cuerda, viento y percusión), indicando los principales subgrupos de cada una de ellas así como varios ejemplos de instrumentos.

Clasificación clásica de los instrumentos musicales (cuerda, viento y percusión)				
Tipo	Subtipos			Ejemplos
Cuerda	Frotada			Violín, viola, violonchelo, contrabajo.
	Pulsada o pellizcada			Arpa, clavicémbalo, clave, guitarra, laúd.
	Percutida			Piano, clavicordio, címbalo.
Viento	Insuflados por el soplo humano	Viento madera	Fuente sonora: corriente de aire oscilante	Flauta, flautín.
			Fuente sonora: vibraciones mecánicas de la lengüeta	Lengüeta simple
		Lengüeta doble		Oboe, corno inglés, fagot, contrafagot.
	Viento metal		Trompeta, trompa, trombón, bombardino, tuba.	
Insuflados mecánicamente				Acordeón, órgano de tubos.

<b>Percusión</b>	<b>Clasificación A</b> (punto de vista musical)	Entonación definida (Altura determinada)	Marimba, celesta, xilófono, vibráfono, timbal.
		Entonación indefinida (altura indeterminada)	Triángulo, platillos, gong, crótalos, cencerro.
	<b>Clasificación B</b> (punto de vista estructural, según el elemento vibrante)	Membranas	Tambor, timbal, bombo.
		Placas	Platillos, gong, crótalos.
		Barras/varillas	Marimba, celesta, xilófono, vibráfono, triángulo.
	<b>Clasificación C</b> (en orquestas)	Percusión de membranas	Timbal, bombo, tambor.
		Percusión de láminas	Marimba, celesta, xilófono, vibráfono,
		Pequeña percusión	Triángulo, cencerro, crótalos.

**Tabla I.C.2.** Clasificación de los instrumentos musicales tradicional o clásica.

## 2. Fundamentos físico-acústicos de los instrumentos de cuerda

Los instrumentos cordófonos producen sonido por medio de la excitación de una o más cuerdas, cuyas vibraciones resuenan en la caja de resonancia que poseen la mayoría de ellos. Estas vibraciones, excepto en lo que se refiere a algunas estridencias o asperezas, son transversales.

La altura fundamental a la que se oye una cuerda depende de su longitud, su tensión y su masa. Su amplitud varía en función de la energía que se le comunica y transmite, y su timbre lo hace según los armónicos que vayan surgiendo.

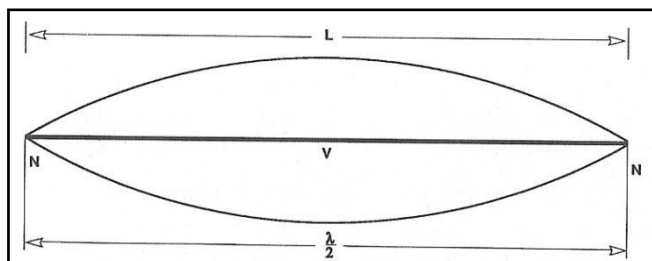
### 2.1. Vibración de una cuerda fija por ambos extremos

La frecuencia del sonido producido por una cuerda es función de la longitud de la misma y de las características de dicha cuerda, tales como tensión en la que está sometida, masa, densidad, sección, etc. Dichas características determinan la velocidad de propagación de la onda en la cuerda. Conocidas éstas y la longitud de la misma, se puede deducir la frecuencia del sonido producido [14].

### 2.1.1. Obtención de la frecuencia del sonido producido

- **Armónico fundamental**

La frecuencia del sonido fundamental se produce con una onda estacionaria definida por dos nodos (N) en los extremos y un vientre (V) en el centro (**figura I.C.1**).



**Figura I.C.1.** Producción del armónico fundamental de una cuerda.

En estas condiciones se cumple que la longitud de la cuerda (L) y la longitud de onda entre los dos nodos ( $\lambda/2$ ) tienen el mismo valor:

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

En todo movimiento ondulatorio se cumple que la velocidad de propagación de la onda (c) es el producto de la frecuencia (f) por la longitud de onda ( $\lambda$ ):

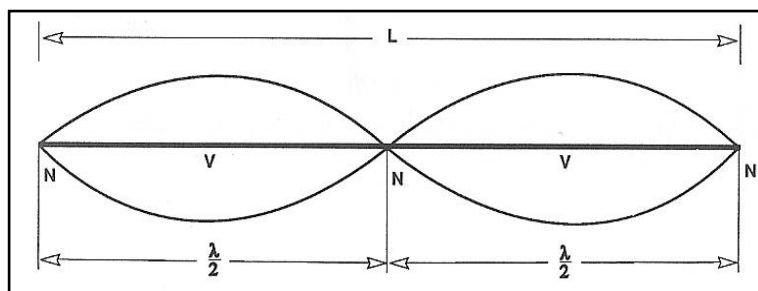
$$c = f \cdot \lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$

Despejando y sustituyendo se obtiene la expresión de la frecuencia fundamental ( $f_1$ ):

$$f_1 = \frac{c}{2L}$$

- **Segundo armónico**

Se produce con los dos nodos en los extremos y uno en el centro, habiendo por lo tanto dos vientres.



**Figura I.C.2.** Producción del 2º armónico de una cuerda

Igualando la longitud de la cuerda ( $L$ ) a las longitudes de onda ( $\lambda$ ):

$$L = 2 \cdot \frac{\lambda}{2} \rightarrow \lambda = L$$

Sustituyendo se logra la frecuencia del segundo armónico ( $f_2$ ):

$$f_2 = \frac{c}{L}$$

Al relacionar la frecuencia del armónico fundamental con la del segundo armónico se demuestra que:

$$f_2 = 2f_1$$

### ▪ Tercer armónico

Para el tercer armónico, la onda estacionaria presenta cuatro nodos y tres vientres.

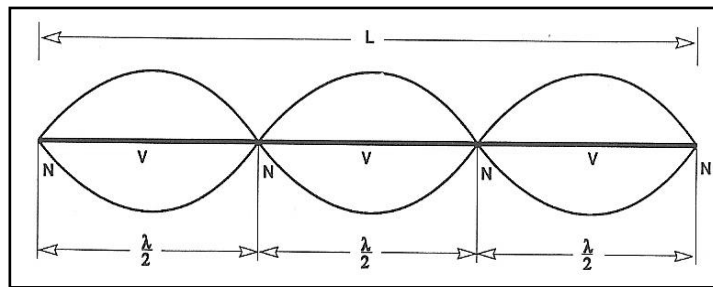


Figura I.C.3. Producción del 3º armónico de una cuerda.

Igualando la longitud de la cuerda ( $L$ ) con las longitudes de onda ( $\lambda$ ):

$$L = 3 \frac{\lambda}{2} \rightarrow \lambda = 2 \frac{L}{3}$$

Sustituyendo:

$$f_3 = \frac{3c}{2L}$$

Al relacionar la frecuencia del armónico fundamental con la del tercer armónico se demuestra que:

$$f_3 = 3f_1$$

Procediendo de igual manera para el resto de los armónicos se cumple que para el armónico de orden  $n$ :

$$L = n \frac{\lambda}{2} \rightarrow \lambda = 2 \frac{L}{n}$$

Sustituyendo se consigue la expresión general de la frecuencia de las cuerdas vibrantes:

$$f_n = \frac{nc}{2L} = nf_1$$

Por lo tanto la frecuencia del armónico  $n$  es igual a  $n$  veces la frecuencia fundamental ( $f_1$ ), en donde  $n$  es el número de orden del armónico y también el número de vientres de la onda estacionaria formada.

### 2.1.2. Leyes de Mersenne

Marin Mersenne expuso en 1636 las leyes que rigen la frecuencia de los sonidos producidos por una cuerda en vibración. En el siglo XVIII Euler y D'Alamber establecieron la teoría matemática que las sustentaban.

Se demuestra que la velocidad de propagación ( $c$ ) de una perturbación transversal en una cuerda depende únicamente de la tensión ( $T$ ) a la que está sometida y de la masa por unidad de longitud ( $\mu$ ), según la siguiente expresión:

$$c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

La masa por unidad de longitud  $\mu = (M/L)$  es igual a la densidad de la cuerda ( $d$ ) por la sección de la misma ( $\pi r^2$ ):

$$\mu = d\pi r^2$$

Por lo tanto la velocidad ( $c$ ) adoptará estas dos expresiones:

$$c = \sqrt{\frac{T}{M/L}} = \sqrt{\frac{T}{d\pi r^2}}$$

Sustituyendo en la ecuación general de la frecuencia de las cuerdas vibrantes, se tendrá:

$$f_n = \frac{nc}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{d\pi r^2}}$$

A partir de la anterior expresión se deducen las Leyes de Mersenne **[14]**:

1. La frecuencia del sonido producido por una cuerda es inversamente proporcional a la longitud de la misma. Así, a cuerdas cortas le corresponderán frecuencias altas y a cuerdas largas frecuencias bajas.
2. La frecuencia del sonido producido por una cuerda es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la tensión a la que está sometida. Este es un conocido principio de los instrumentos de cuerda, en los que para afinar se debe mover las clavijas en el sentido necesario para dar mayor o menor tensión a la cuerda hasta conseguir la frecuencia deseada.
3. La frecuencia del sonido producido por una cuerda es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de la misma. Las cuerdas más densas producen frecuencias más bajas que las cuerdas menos densas. En instrumentos como el piano o el arpa se recurre al entorchado de las cuerdas de la región grave con el objetivo de aumentar la densidad de las mismas.
4. La frecuencia del sonido producido por una cuerda es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la sección de la misma o, lo que es lo mismo, de su diámetro. En efecto, las cuerdas más gruesas, las de mayor diámetro, se emplean en las regiones graves, reservándose las finas para el registro agudo.
5. La frecuencia del sonido producido es inversamente proporcional a la temperatura. Conforme la temperatura aumenta, la cuerda se dilata y pierde tensión.

## 2.2. Serie armónica

Como se ha detallado en apartados anteriores, la longitud sonora total de una cuerda suficientemente tensa entre dos puntos vibrará, a menos que se impida de algún modo, como un todo con una frecuencia periódica que proporcionará el primer armónico o fundamental. Además, vibrará en sus diversas divisiones, aportando armónicos superiores hasta que la energía que los hace ascender a lo largo de la serie disminuye y queda reducida a cantidades insignificantes.

Se define como serie armónica de un sonido o escala de la resonancia superior a la gama de sonidos que acompañan a un sonido fundamental ( $f_1$ ), de tal forma que dichos sonidos están relacionados con el fundamental por un número entero de veces la frecuencia de este ( $2f_1$ ,  $3f_1$ ,  $4f_1$ , etc.) [14].

### 2.2.1. Determinación de las notas musicales de la serie

Desde el punto de vista de la teoría musical es necesario adjudicarle un nombre a cada sonido de la serie armónica una vez definido el nombre del sonido fundamental. Puesto que la representación musical se hará empleando el sistema temperado, el método adoptado consiste en calcular el intervalo temperado que corresponde a cada pareja de armónicos consecutivos.

En el sistema temperado la octava se divide en 12 partes llamadas semitonos. El valor del semitono temperado viene definido por la expresión:

$$\sqrt[12]{2}$$

El método matemático consiste en calcular el número de semitonos que hay entre cada dos armónicos consecutivos. Para ello, se eleva el valor del semitono temperado a un número genérico  $x$  que será la incógnita. Sean  $a$  y  $b$  dos armónicos cualquiera, siendo  $a$  el armónico de menor orden y  $b$  el inmediatamente posterior. En estas condiciones el planteamiento será el siguiente:

$$(\sqrt[12]{2})^x = \frac{b}{a} \rightarrow x = 12 \cdot \frac{\log b - \log a}{\log 2}$$

A continuación, en la **tabla I.C.3**, se presentan los primeros 15 intervalos de la serie armónica.

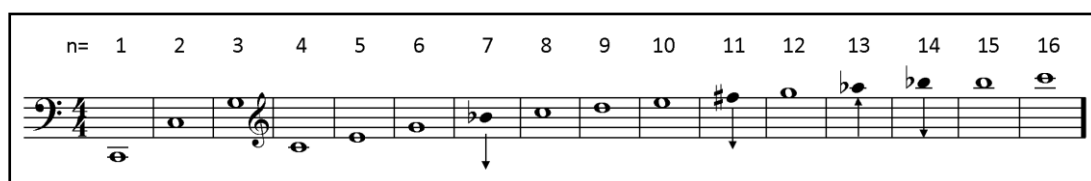
Intervalo	x (Semitonos reales)	x (Semitonos corregidos)	Intervalo musical	Intervalos con importantes desafinaciones
b : a				
2 : 1	12	12	<b>Octava</b>	
3 : 2	7,02	7	<b>Quinta Justa</b>	
4 : 3	4,98	5	<b>Cuarta Justa</b>	
5 : 4	3,86	4	<b>Tercera mayor</b>	
6 : 5	3,16	3	<b>Tercera menor</b>	
7 : 6	2,67	3	Tercera menor	*
8 : 7	2,31	2	Segunda Mayor	
9 : 8	2,04	2	<b>Segunda Mayor</b>	
10 : 9	1,82	2	Segunda Mayor	
11 : 10	1,65	2	Segunda Mayor	*
12 : 11	1,51	1	Segunda menor	*
13 : 12	1,39	1	Segunda menor	*
14 : 13	1,28	2	Segunda Mayor	*
15 : 14	1,19	1	Segunda menor	*
16 : 15	1,12	1	<b>Segunda menor</b>	

**Tabla I.C.3.** Relación de los 15 primeros intervalos de la serie armónica.

El valor obtenido de la cantidad de semitonos se redondea al número entero más próximo ya que el sistema temperado no tiene fracciones de semitono. No obstante, dentro de los primeros 16 armónicos existen dos excepciones: las parejas de armónicos 11-12 y 13-14, en las que el redondeo no se realiza al número entero más próximo.

Estas excepciones responde a una operación de ajuste con el objetivo de respetar en notas musicales las distancias de octavas que debe existir entre armónicos que cumplan la regla de  $b=2 \cdot a$ , como por ejemplo entre los armónicos 6 y 12. Esto conlleva a que la altura de varias de las notas representadas difiera considerablemente de la real. Este es el caso de los armónicos 7, 11, 13 y 14.

En la **figura I.C.4** se muestra como ejemplo la representación musical de los primeros 16 parciales de la serie armónica de la nota Do<sub>2</sub> (frecuencia fundamental). Se señalan en negrita los armónicos “desafinados” y indicándose con una flecha si el sonido debe ser más agudo o más grave del representado.



**Figura I.C.4.** Serie armónica tomando como fundamental la nota Do<sub>2</sub>.



## 2.2.2. Papel de cada armónico dentro de la serie armónica

Los distintos armónicos contribuyen al timbre del sonido siguiendo estas pautas:

- El armónico fundamental proporciona por sí mismo la misma sensación de altura que el fundamental con todos los demás armónicos resonando. Debido al fenómeno de la “fundamental fantasma” que se explica dado el carácter no lineal del oído humano, la presencia del armónico fundamental no es imprescindible para percibir el sonido en conjunto como una nota con la misma frecuencia que el armónico fundamental. Para ello es necesario que suenen el resto de armónicos de la serie. Así, el sistema auditivo reconstruye el sonido que falta como si dedujese el resultado de una ecuación cuya única solución posible es dicha fundamental.
- Los armónicos 2, 4 y 8 y todos los que formen una relación igual a una potencia de 2 con la fundamental refuerzan el carácter inequívoco de la sensación de altura del conjunto.
- Los armónicos 3, 6, 12 y todos aquellos que forman con el 3 una relación que es una potencia de 2 aportan un timbre nasal al conjunto.
- Los armónicos 5 y 10 producen un timbre calificado como: “redondo”, “profundo” o “cálido” entre otros adjetivos semejantes.
- Los armónicos 7, 11, 13 y 14 son los más disonantes y dan un carácter “áspero” al sonido.

## 2.3. Excitación de las vibraciones en las cuerdas

La energía que entra a formar parte de los diferentes parciales de la serie armónica resulta afectada por varios factores. Además de la propia posición de los armónicos en la serie influye en gran medida el procedimiento mediante el cual se provoca la vibración de las cuerdas. Existen tres modos básicos de excitar vibraciones sonoras en ellas: punteo, percusión o frotamiento.

### 2.3.1. Cuerdas percutidas

Excitar las cuerdas golpeándolas, por ejemplo con un martillo, favorece una caída más lenta de los armónicos más agudos. No obstante, si la cuerda está relativamente rígida y tensa, como sucede en el piano moderno, la mayor parte de la energía puede desplazarse hacia los armónicos más graves.

El tamaño, la densidad y la forma del instrumento percutor y la energía con la que este golpea la cuerda influirá en las características tímbricas y de amplitud del sonido producido.

Un martillo puede ser grande o pequeño, resistente o elástico, de impacto rápido o lento. Cuando es ancho y suave y el golpeo a la cuerda no es muy brusco, el martillo tiende a cubrir una mayor cantidad de cuerda durante un período de tiempo más largo, realzando así los armónicos de frecuencia más grave. Así, el timbre obtenido es menos brillante que si se emplearan martillos estrechos y duros percutiendo la cuerda vigorosamente. En este último caso los macillos rebotarían con mayor rapidez realzando los armónicos de mayor frecuencia.

Estas nociones básicas se desarrollarán con más profundidad cuando se trate el mecanismo de percusión del piano en el **Anexo I.D.**

# I.D. EL PIANO

## 1. Introducción

El piano es un instrumento musical catalogado como instrumento de cuerdas percutidas o instrumento de teclado de cuerdas percutidas por el método de clasificación clásico o tradicional, y un cordófono simple con teclado y caja de resonancia como resonador según la clasificación de Hornbostel-Sachs.

Está formado por un arpa cromática de cuerdas de acero que son excitadas mediante un mecanismo de percusión indirecta, en el que una serie de martillos forrados de fieltro golpean las cuerdas accionados a través de un teclado. Las vibraciones de las cuerdas se transmiten a través de los puentes a la tabla armónica que los amplifica. Las cuerdas, el mecanismo de percusión y la tabla armónica se encuentran dentro de la caja de resonancia, también denominada mueble, que es el recinto cerrado del piano que tiene la misión de amplificar y modular el sonido generado en él.

Este instrumento, también llamado *pianoforte* en sus orígenes, fue inventado a principios del s. XVIII por el constructor de claves italiano Bartolomeo Cristofori. Entre sus antecesores se hallan instrumentos como el monocordio, el salterio y el dulcémele; y posteriormente, el clavicordio, la espineta, el virginal y el clavicémbalo.

A lo largo de los ss. XVIII y XIX el piano ha evolucionado manteniendo la morfología y los principios de funcionamiento que caracterizaron a los primeros pianofortes construidos por Cristofori. A partir del año 1880 se considera que se puede hablar de piano moderno tal y como se le conoce actualmente, puesto que las modificaciones incorporadas posteriormente han sido sutiles.

El piano se ha convertido en uno de los instrumentos más conocidos y utilizados a nivel mundial. En el año 1732 se empezó a componer específicamente para él, convirtiéndose en el instrumento representativo del período del romanticismo musical durante el cual adquirió el papel relevante que ha conservado hasta hoy en día. En el plano de la música clásica es empleado en la interpretación solista, de música de cámara y sinfónica. Asimismo está muy asentado en otros estilos musicales como, por ejemplo, el jazz, la música latina, el pop y el rock, aunque en ellos a menudo es reemplazado por teclados eléctricos. Su característica polifónica lo convierte, además, en un instrumento ideal para el acompañamiento y como ayuda a la tarea compositiva.

A lo largo de la historia han existido diferentes tipos de pianos como el piano de juguete, la pianola, el piano jirafa, el piano rectangular, etc., aunque los más comunes son el piano de cola y el piano vertical o de pared.

En el presente Anexo se expondrán las principales características del piano vertical pero únicamente se profundizará en el piano de cola ya que las muestras sonoras obtenidas para documentar el presente estudio acústico se realizaron en este tipo de piano. No obstante, las partes constituyentes y los principios de funcionamiento de uno y otro son, a grandes rasgos, muy similares.

En los sucesivos apartados se realizará una panorámica sobre el piano con el objetivo de adquirir una base teórica que permita comprender con mayor facilidad el estudio acústico de este instrumento. Se proporcionará información del mismo tanto a nivel histórico, detallando su origen y su evolución hasta el piano moderno, como de su anatomía y principios de funcionamiento, especificando también sus características acústicas más relevantes.

## 2. Origen y evolución histórica del piano

Para llegar a la construcción del piano moderno que hoy en día se puede encontrar en las salas de conciertos o comprar en las tiendas especializadas han tenido que transcurrir siglos de evolución, partiendo de instrumentos antecesores primigenios como el monocordio o el salterio que a primera vista poco tienen que ver en su morfología con los pianos actuales.

Conforme se avanza en el tiempo surgen más variedades de instrumentos con la incorporación de nuevos elementos constitutivos. Uno de los saltos evolutivos más importantes que caracteriza al piano es la aparición del teclado. Nuevos instrumentos surgieron debido a la agregación de este componente: el clavicordio, la espineta, el virginal, el clavicémbalo, etc. Estos, aunque difieran con el piano moderno en muchos aspectos como, por ejemplo, su mecanismo de acción, ya se les puede relacionar morfológicamente con este.

El elemento común de los instrumentos que conforman la línea evolutiva del piano es que todos son cordófonos, es decir, comparten el mismo elemento vibrante: la cuerda.

El primer instrumento que puede denominársele con este nombre o, mejor aún, con el de *pianoforte*, apareció a principios del s. XVIII de la mano del constructor italiano Bartolomeo Cristofori. Aunque posteriormente ha habido mejoras en su diseño, la esencia de la estructura y mecanismo de funcionamiento de este primer piano se ha conservado hasta hoy en día.

El piano actual es por tanto fruto de un continuo esfuerzo y dedicación de los constructores que han tratado de adaptar el instrumento a las exigencias de intérpretes y compositores, en definitiva, a la propia evolución musical.

## 2.1. Instrumentos precursores

Para conocer los orígenes del piano hay que remontarse a la Antigüedad para estudiar los instrumentos musicales a partir de los cuáles este evoluciona.

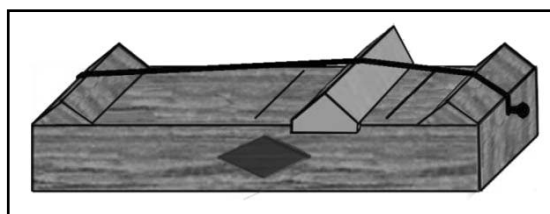
### 2.1.1. Primeros cordófonos

En los siguientes instrumentos hay una serie de elementos constitutivos comunes con el piano actual, aunque estos hayan variado en cuanto a su morfología, tamaño y material de construcción. Todos comparten una estructura o bastidor en donde se sujetan un variado número de cuerdas tensas las cuales vibran a unas determinadas frecuencias que son amplificadas por una tabla armónica o caja de resonancia.

#### 2.1.1.1. Monocordio

El monocordio consistía en una sola cuerda (mono: una, cordio: cuerda) tensada sobre una caja de resonancia de madera y que se ponía en vibración punteándola, frotándola o percutiéndola. Por ello, se puede considerar a este instrumento como el origen de todos los cordófonos [40].

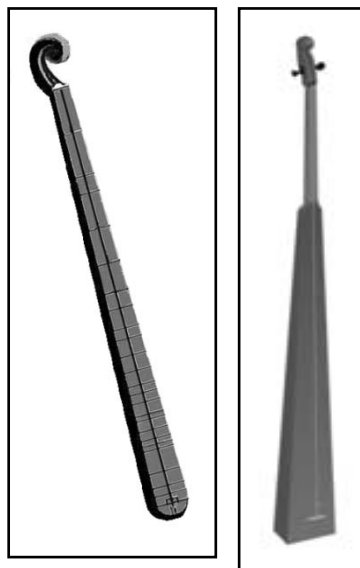
Fue utilizado ya por Pitágoras en el s. VI a.C. para la determinación experimental de las leyes de las cuerdas vibrantes y obtener las proporciones matemáticas de los intervalos musicales. El monocordio usado por Pitágoras contaba con un puente deslizante que modificaba la longitud de vibración libre de la cuerda, y por tanto, variaba la frecuencia de la misma. Se tocaba con los dedos o con plectros.



**Figura I.D.1.** Monocordio básico o diapasón (Monocordio de Pitágoras).

Otros matemáticos también hicieron uso de él como el caso de Euclides, que en el s. III a.C. basó su geometría euclidiana en las divisiones de este instrumento.

En sus orígenes fue usado más como herramienta al servicio de los experimentos matemáticos que como un instrumento musical. Ya en la Edad Media se siguió utilizando para la enseñanza teórica y práctica de la música y como diapasón para determinar el afinado de otros instrumentos. Se solían tocar con los dedos y también mediante un arco.



**Figura I.D.2.** Diferentes modelos de monocordios usados en la Edad Media (Izq: monocordio tocado con los dedos o arco, der: monocordio de arco (o trompeta marina)).

### 2.1.1.2. Policordio

A partir del principio morfológico y de funcionamiento del monocordio se construyeron instrumentos agregando más cuerdas. Etimológicamente se les puede considerar policordios (poli: muchas, cordio: cuerda) aunque no es común denominárseles de ese modo, sino con los nombre específicos que se les dieron a cada uno de ellos. El salterio y el dulcemele son ejemplos de policordios primitivos.

### 2.1.1.3. Salterio

Este instrumento tuvo su origen la zona del Próximo Oriente, alrededor del s. I a. C. y fue introducido en Europa alrededor del s. XII. Su caja de resonancia solía tener forma trapezoidal, en función de las distintas longitudes de sus cuerdas, que fue utilizada posteriormente en el diseño de los primeros claves [40]. Las cuerdas se disponían sobre una tabla armónica que tenía pequeños puentes tonales. Este instrumento podía ser de cuerda pulsada o percutida según la forma de poner en vibración sus cuerdas. Normalmente se hacía sonar mediante la pulsación con los dedos o con un plectro, o bien golpeándolas con varillas.

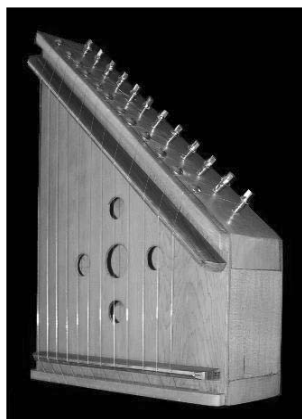


Figura I.D.3. Salterio.

#### 2.1.1.4. Dulcimer o dulcemele

El dulcimer constituye una variación del salterio. Sigue los mismos principios de construcción pero se ideó para que las cuerdas fueran excitadas únicamente mediante la percusión con un par de varillas. Es considerado por muchos como el primer instrumento de cuerda percutida [40].



Figura I.D.4. Dulcimer.

#### 2.1.2. Incorporación del teclado

Los instrumentos de cuerda con teclado tienen la característica de desarrollar un mecanismo de acción indirecta sobre las cuerdas. En el s. XV, tras años de experimentos con cordófonos más primitivos, se aplicó con éxito este mecanismo sobre un instrumento más evolucionado dando origen al clavicordio. Hasta ese momento el teclado y los instrumentos de cuerda habían evolucionado de manera independiente.

El teclado nació y evolucionó relacionado con el desarrollo del órgano surgiendo como solución para activar el mecanismo que dirigía las corrientes de aire a través de los tubos de este instrumento.

Aunque no se conoce con exactitud la época de invención del teclado, ya en el s. I a.C. se tiene constancia de la existencia del mismo según escritos de Vitrubio donde se mencionaba el uso de rudimentarias teclas en los órganos de la época. En el s. II d.C. se mejoró el mecanismo construyéndose un órgano con teclas provistas de muelles que las devolvía a su posición inicial tras dejar de ser pulsadas.

La evolución de este tipo de teclados debió ser bastante lenta, si se tiene en cuenta los escritos de Seidel en cuales se afirmaba, por ejemplo, que los órganos de las Catedrales de Winchester y de Magdeburgo, en el s. XI, poseían unas teclas de 1,78 m de largo y 15 cm de ancho. En el s. XIII el teclado de este último órgano fue mejorado reduciéndose las teclas a 65 cm de longitud por 8 cm de ancho.

### 2.1.2.1. Clavicordio

El mecanismo de acción indirecta sobre los instrumentos de cuerda se desarrolló primero en el monocordio, al cual se le incorporó un teclado, de manera que cada tecla era una palanca en uno de cuyos extremos se fijó una pequeña pieza metálica denominada tangente. Cuando se pulsaba la tecla la tangente golpeaba la cuerda dividiéndola en dos secciones. Como uno de los extremos de la cuerda estaba constantemente silenciado por un trozo de fieltro, únicamente la otra parte de la cuerda estaba en condiciones de vibrar. Cuando se levantaba la tecla, el fieltro apaga la vibración de la cuerda. Este procedimiento de excitación de las cuerdas se llama mecanismo de tangente.

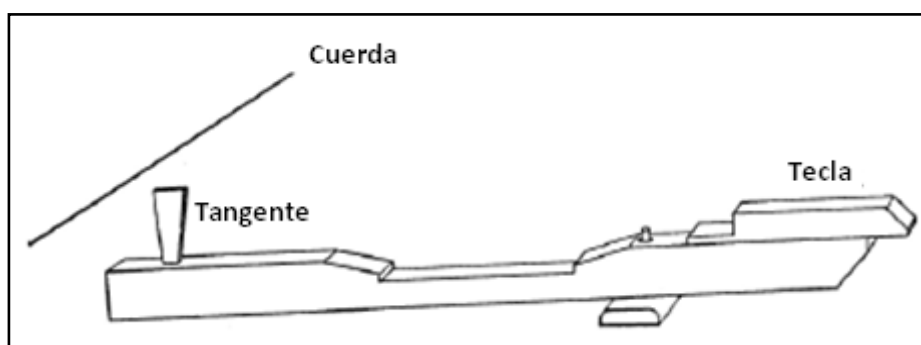


Figura I.D.5. Mecanismo de tangente [2].

Con este mecanismo se podían conseguir distintas alturas de una misma cuerda, tantas como teclas hubiera, ya que cada una de ellas golpeaba a la cuerda en distintos lugares dividiendo esta en proporciones diferentes. Así se variaba la longitud de la cuerda vibrante y se podían lograr distintas notas.

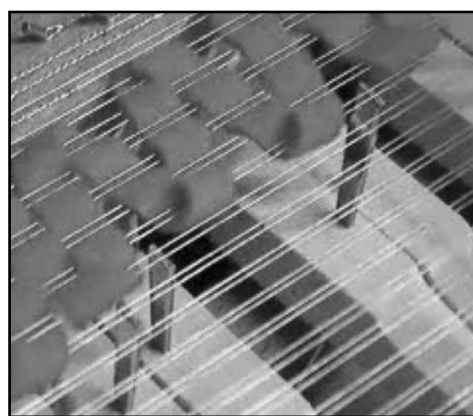


Sin embargo, la práctica polifónica era imposible en este instrumento. Para lograr interpretar notas simultáneamente se le empezó a añadir cuerdas al mismo, constituyendo de esta manera, a principios del s. XV un instrumento llamado **clavicordio ligado**. No obstante, el número de cuerdas era bastante reducido, unas 20 en total. Al no haber tantas cuerdas como teclas, varias notas eran producidas sobre la misma cuerda utilizando distintas teclas así que únicamente se podían tocar algunos intervalos armónicos.

Continuando con su desarrollo se llegó a la forma definitiva del **clavicordio** en el s. XVII, el cual conservaba el mecanismo de percusión de tangente pero tenía una cuerda o incluso dos cuerdas unísonas por tecla.



**Figura I.D.6.** Clavicordio.



**Figura I.D.7.** Detalle del mecanismo de tangente del clavicordio.

El clavicordio posee, en la mayoría de los casos, una caja de resonancia rectangular ocupando el teclado uno de los lados largos del instrumento. Al principio la extensión del instrumento abarcaba 4 octava y llegó a tener 5 octavas. Las cuerdas están colocadas perpendicularmente a las teclas siendo las más graves, normalmente de latón o cobre, las que se situaban delante de las más agudas fabricadas de acero.

Este instrumento, como cualquier otro, tiene sus ventajas e inconvenientes. La desventaja más relevante era que el instrumento producía un sonido muy débil a causa de sus cortas cuerdas sumado a las pequeñas dimensiones de su tabla armónica y su reducida caja de resonancia. En cambio, un aspecto positivo era que el intérprete podía tener un gran control de la dinámica, dado que la intensidad del sonido se conseguía controlar desde el teclado debido al contacto casi directo entre los dedos y la cuerda. Incluso es posible controlar el sonido después ataque variando la presión sobre la tecla, ejecutando vibratos y portamentos [41].

Fue usado hasta principios del s. XIX, sobre todo como instrumento de estudio de los organistas, aunque la aparición del clavicémbalo le arrebató el protagonismo entre los instrumentos de teclado.

### 2.1.2.2. Familia del clavicémbalo

La búsqueda de una mayor potencia sonora en el clavicordio constituyó el gran desafío al que se enfrentaron los constructores. Así, en el s. XVI, se desarrollaron otros instrumentos similares al clavicordio como la **espineta** y el **virginal**, ambos provistos con cuerdas más largas. Tras intentar aplicarles el mecanismo de tangente se concluyó que este no era adecuado para percutir cuerdas de una longitud superior a las del clavicordio [2].

Por ello, se ideó otro método de excitación de las cuerdas denominado mecanismo de cañón de plumas. Este consiste en un plectro montado sobre una pieza de madera denominada saltador que sube y baja lateralmente a la cuerda. Al ser accionada la tecla el saltador sube y el plectro (una punta de pluma) pellizca la cuerda. Cuando la tecla se suelta, el saltador baja y un apagador se encarga de atenuar la vibración de esta [41].

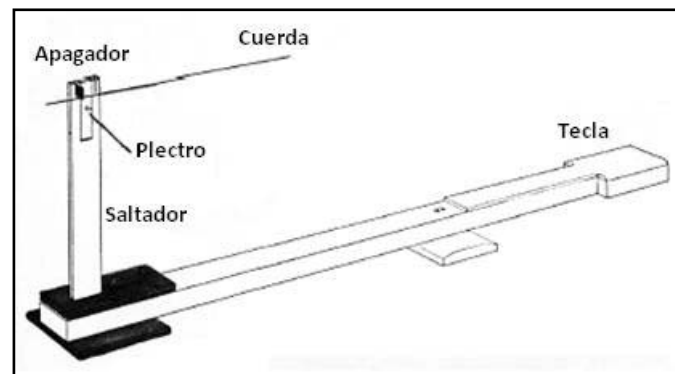
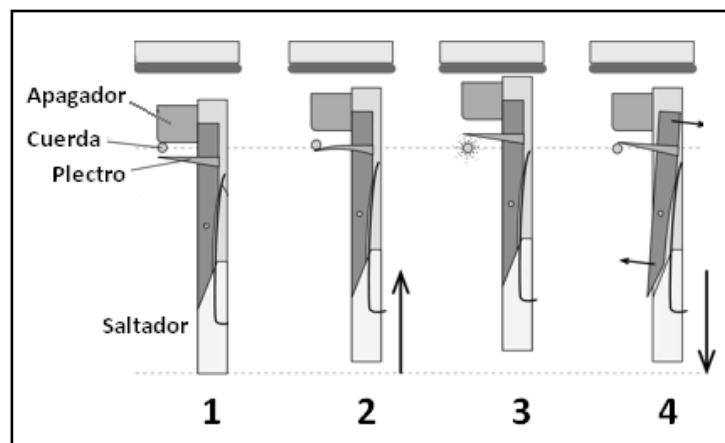


Figura I.D.8. Mecanismo de cañón de plumas [2].

En la siguiente figura se representan las fases del movimiento de este mecanismo:



**Figura I.D.9.** Funcionamiento del mecanismo de cañón de plumas. 1) Estado de reposo: el apagador está tocando la cuerda para que no vibre. 2) Cuando la tecla es presionada el saltador se eleva y el plectro toca a la cuerda y empieza a doblarse. 3) El plectro pellizca la cuerda y ésta comienza a vibrar y por tanto a emitir sonido el instrumento. 4) Cuando se deja de pulsar la tecla, el saltador baja por su propio peso y el apagador vuelve a detener el movimiento de la cuerda (en la bajada el plectro esquiva a la cuerda para no ponerla en vibración) [40].

El **virginal** es un instrumento muy parecido morfológicamente al clavicordio, aunque utilizan mecanismos de acción diferentes. El virginal incorporó el mecanismo de cañón de plumas anteriormente explicado. Fue usado en los siglos XVI y XVII sobre todo en los Países Bajos, Alemania e Inglaterra y constituye la forma más antigua y simple del clavicémbalo, con una sola cuerda por nota. En la segunda mitad del s. XVII comienza a declinar y es sustituido por la espineta y el clavicémbalo.



**Figura I.D.10.** Virginal.



**Figura I.D.11.** Doble virginal.

Había una variante del virginal denominada doble virginal que consistía en la agregación de un instrumento más pequeño afinado a la octava que se colocaba encima. Los teclados de ambos instrumentos podían acoplarse, permitiendo así una mayor variedad de timbres y matices.

La **espineta** también cuenta con un mecanismo de cañón de plumas como el virginal pero difiere de éste morfológicamente. Aunque su forma es variada, predomina la triangular y la alada. Las cuerdas, una por nota, parten en ángulo de 45° respecto al teclado, disposición que, unida a la especial anatomía de la caja de resonancia, permite usar cuerdas más largas, beneficiando así una mayor sonoridad del instrumento. Alcanza su época de esplendor en los siglos XVII y XVIII y fue usada principalmente en Italia y Alemania.



**Figura I.D.12.** Espineta en forma triangular.



**Figura I.D.13.** Espineta en forma de ala.

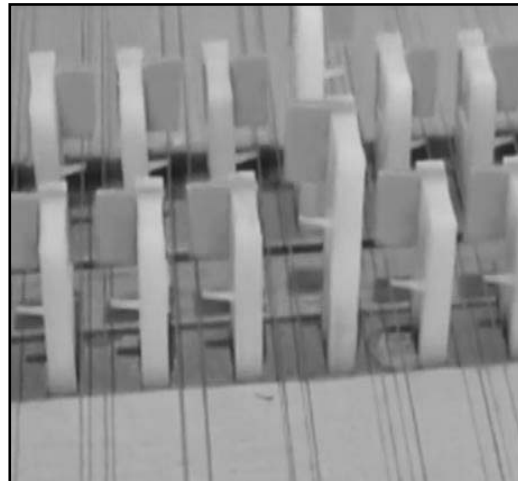
Experimentando con cuerdas más largas y el nuevo mecanismo de acción de cañón de plumas surgió en el s. XVI en Italia un nuevo instrumento: el **clavicémbalo o clave**, que representa el más alto grado de evolución de los instrumentos de su familia.

Rápidamente su uso se extendió en Europa Occidental y tuvo durante los siglos XVII y XVIII un enorme éxito. Desempeñó un papel protagonista como instrumento director, como acompañante mediante la ejecución del bajo continuo y como solista. A finales del s. XVIII fue desplazado de su rol protagonista por el pianoforte.

El clave tiene una forma alada similar a la de la espineta, aunque es de mayor tamaño. Normalmente consta de dos teclados, ocasionalmente tres, llegando a alcanzar una extensión de 5 octavas.



**Figura I.D.14.** Clavicémbalo.



**Figura I.D.15.** Detalle del mecanismo de cañón de plumas del clavicémbalo.

Las cuerdas parten en ángulo recto con respecto al teclado. Al igual que en el clavicordio, se incluyeron en algunos casos varias cuerdas unísonas por nota con el objetivo de aumentar el volumen sonoro del instrumento, que ya de por sí, era bastante mayor al del clavicordio.

A diferencia de este último, el clave permite al intérprete muy pocas variaciones dinámicas. Esta carencia se intenta suplir con la implementación de diferentes registros de cuerdas accionados mediante pulsadores o tiradores especiales, pedales o teclados múltiples. Según el registro elegido el número de cuerdas pulsadas por nota podía ser variado. Otro inconveniente del instrumento es la necesidad de afinarlo continuamente y la extrema fragilidad de los plectros, que originariamente eran plumas de aves, por lo que tenían que ser reemplazados con gran frecuencia.

## 2.2. El primer pianoforte

Bartolomeo Cristofori (1655-1731) un constructor de claves italiano, trató de solucionar en un nuevo instrumento los problemas del clavicordio (poco volumen sonoro) y los del clave (escaso rango dinámico, rápida desafinación, fragilidad de los plectros y sonido poco sostenido). A este nuevo instrumento lo denominó **Gravicembalo col piano e forte** (clavicémbalo con sonido débil y fuerte) en referencia a su capacidad de producir sonidos con diferentes intensidades dependiendo de la presión ejercida sobre las teclas: mientras más fuerte se pulse ésta la intensidad sonora es mayor. Más tarde se le llamaría pianoforte, y posteriormente, piano, que es como se le denomina actualmente.

El número total de pianofortes fabricados por Cristofori se desconoce, así como la fecha exacta de construcción del primero de ellos. Se estima que construyó unos veinte, pero hoy en día sólo se conservan tres, todos fechados en la década de 1720 [40].

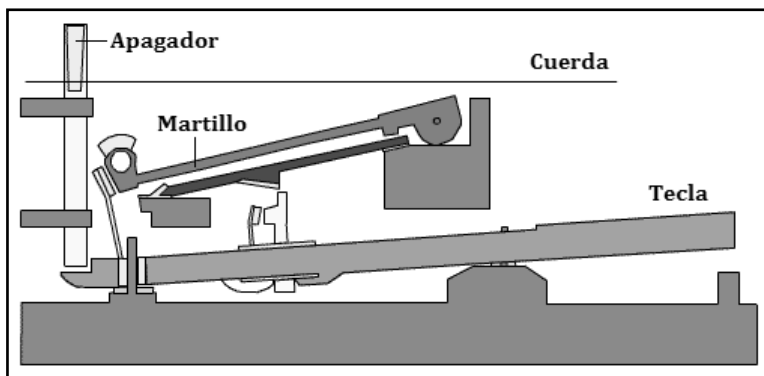
Normalmente se data el nacimiento del pianoforte en el año 1709 cuando fue publicado un artículo de Scipione Maffei sobre este instrumento. Sin embargo, el verdadero origen del pianoforte está en la última década del s. XVII teniendo en cuenta los registros de un inventario de instrumentos guardados de la familia Medici, para la que Cristofori trabajaba, realizado en el año 1700. En ellos se señalaba la existencia de un instrumento de similares características al pianoforte.

En el pianoforte reunió características de sus más próximos predecesores: el clavicordio y el clave. Del clavicordio incorporó su naturaleza percusiva y del clave su forma en forma de ala y los apagadores. Sin embargo, el sistema de percusión que se desarrolló era diferente al usado en el clavicordio. Consistía en la excitación de las cuerdas por medio de pequeños martillos. Un antecedente que tal vez sirviera de inspiración a Cristofori fuera el dulcemele. Los primeros pianos de Cristofori estaban contruidos con cuerdas delgadas y por tanto no alcanzaban la potencia sonora del piano moderno, aunque superaba a la del clavicordio y clavicémbalo.

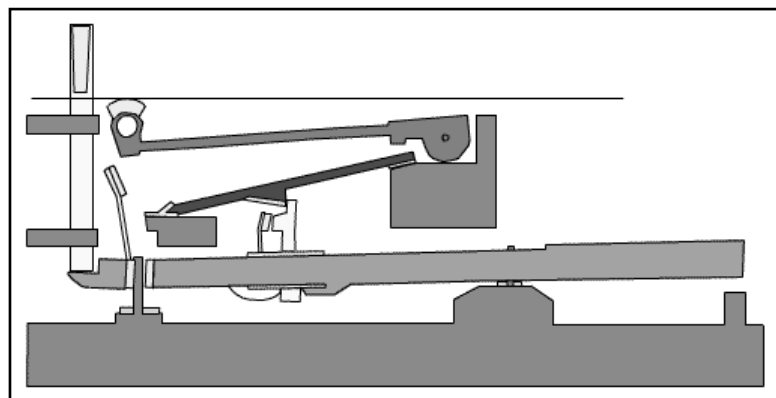
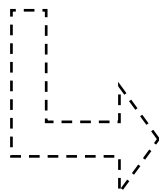
Exteriormente, en forma y dimensiones, el pianoforte no era muy diferente al clavicémbalo. Dentro de la caja armónica se hallaba la tabla armónica, de espesor similar a la del clave, montada sobre un armazón de madera. Las cuerdas estaban tendidas sobre la tabla armónica, fijadas por un extremo a un bastidor y en el otro a un clavijero de afinación y sostenidas por el puente. Además, se mantuvo la extensión de 5 octavas.



**Figura I.D.16.** Piano de cola de Cristofori (1720).



**Figura I.D.17.** Esquema del mecanismo de un piano de cola de Cristofori (ca. 1720) cuando la tecla no está accionada [42].



**Figura I.D.18.** Esquema del mecanismo de un piano de cola de Cristofori (ca. 1720) cuando se ha pulsado la tecla y el martillo está golpeando la cuerda [42].

La principal novedad del pianoforte con respecto a sus instrumentos predecesores más próximos fue su mecánica (**figuras I.D.17 y I.D.18**). Cristofori diseñó un mecanismo en el que la cuerda es golpeada a gran velocidad por un martillo de madera forrado en cuero que es

puesto en movimiento al bajar la tecla asociada a él. Una vez percutida la cuerda el martillo vuelve, por la acción del escape, a su posición original con la mayor celeridad posible dejando vibrar libremente a la cuerda, y permitiendo así repetir la nota rápidamente. Esto es un gran avance con respecto al mecanismo de percusión anterior, el de las tangentes del clavicordio, las cuales se mantenían en contacto con la cuerda mientras la tecla se mantuviera pulsada con el consiguiente amortiguamiento del sonido de la cuerda, que provocaba que el instrumento tuviera poco volumen sonoro y notas poco sostenidas. En el pianoforte, es al levantar la tecla cuando la vibración de la cuerda es extinguida mediante un apagador que se pone en contacto con ella.

### 2.3. Evolución tecnológica del pianoforte

Los primeros pianofortes no habían adquirido todavía una identidad propia de instrumento nuevo, realmente se les consideraban clavicémbalos transformados. Esto era debido en gran medida a que no existía un repertorio escrito expresamente para pianoforte, sino que se interpretaba en él obras compuestas para ser tocadas con el clavicémbalo [41].

Aunque la invención del pianoforte fue fruto del empeño de lograr suplir las carencias del clavicordio y clavicémbalo, tardó casi un siglo en que fuera totalmente aceptado en el círculo musical. En sus inicios, la sonoridad de este apenas mejoraba la del clavicémbalo y su mecanismo estaba bastante alejado de la perfección del piano moderno, a pesar de que la base de la mecánica del piano actual es la inventada por Cristofori.

Fueron necesarios más de 150 años de transformaciones en el pianoforte para constituir el piano moderno que se conoce hoy en día [41]. Los materiales de construcción se optimizaron para mejorar su calidad sonora, el registro se amplió progresivamente y, en definitiva, se mejoró su diseño para lograr un mayor rendimiento del instrumento.

Conforme el instrumento sufría transformaciones iba tomando su propia identidad alejándose de la del clavicordio y clavicémbalo y, por tanto, cada vez un mayor número de compositores se interesaban en las nuevas posibilidades tímbricas que les ofrecía el nuevo instrumento y comenzaban a escribir para él. Las primeras composiciones específicas para piano fueron las 12 sonatas para pianoforte de Guistini editadas en el año 1732. A su vez, los intérpretes percibían diferencias sustanciales entre este y sus antecesores lo que estimulaba su interés en conocerlo y tocarlo contando ya, además, con un repertorio propio.

### 2.3.1. Siglo XVIII

Durante el s. XVIII el instrumento estuvo en continua evolución. Muchos de los constructores de claves empezaron a fabricar también pianofortes y a introducirles mejoras.

El propio Cristofori fue el primero en implantar un nuevo elemento en el pianoforte: el sistema *una corda* en el año 1726. Este consistía en permitir al intérprete desplazar el mecanismo de percusión de tal forma que cada martillo golpeará sobre una menor cantidad de cuerdas de lo habitual para lograr un sonido más suave y tímbricamente modificado. Este dispositivo en forma de pomo era accionado con las manos por el intérprete del instrumento [40].

El trabajo realizado por Cristofori fue recogido en primera instancia por el constructor alemán **Gottfried Silbermann** (1683-1753) que, hacia el año 1730, empezó a construir pianofortes siguiendo el modelo propuesto por Cristofori. En un primer momento no tuvo éxito, tal y como le había sucedido a su creador. En la década de 1730 J. S. Bach probó el nuevo instrumento al que calificó de rudimentario. Años más tarde, Bach se mostró más receptivo al comprobar que Silbermann había atendido sus críticas y había reforzado el volumen del sonido de las octavas más agudas, logrando así un mejor equilibrio dinámico en todo el registro del instrumento. Contar con el favor de una de las más importantes figuras musicales de la época, quien a partir de 1747 incluso ejerció de agente de venta de los pianos Silbermann, impulsó la propagación del pianoforte fomentando así su evolución.

Este constructor inventó un dispositivo en forma de pomo que permitía levantar los apagadores del instrumento y así obtener un efecto sonoro muy semejante al actual pedal de resonancia. Este mecanismo era accionado con las manos por el intérprete.

Silbermann influyó directamente en el desarrollo paralelo de las dos grandes escuelas de construcción de pianofortes del s. XVIII: la inglesa y la alemana-vieneses, a través de sus discípulos más conocidos: Johannes Zumpe y Johann Andreas Stein [40].

#### 2.3.1.1. Escuela alemana o vieneses

Fue iniciada por Andreas Stein (1728 – 1792), un alumno de Silbermann, hacia el año 1770, siendo él y Graf los fabricantes más representativos de esta Escuela

Stein adapta la mecánica diseñada por Cristofori, siendo la característica más importante de sus pianos el que los martillos están en contacto directo con las teclas lo que hace que el movimiento mecánico sea comparable a un rebote. Esto permite un control más preciso y



refinado de la pulsación y una mayor velocidad de respuesta y de repetición de una misma nota. Esta Escuela de construcción pianística se identifica además por:

- Poseer una mecánica ligera.
- Emplear un apagador independiente para cada nota.
- El levantamiento de los apagadores se realiza con las rodillas usando un mecanismo denominado *rodillera* (**figura I.D.20**). Esta forma de accionamiento también se emplea para el sistema *una corda*.
- La corta calada de las teclas (4-5 mm).
- Unos martillos pequeños y ligeros recubiertos de cuero.
- Unas cuerdas delgadas, dobles por lo general.
- Una delgada tabla armónica que tenía una sonoridad clara, delicada y rica en armónicos.

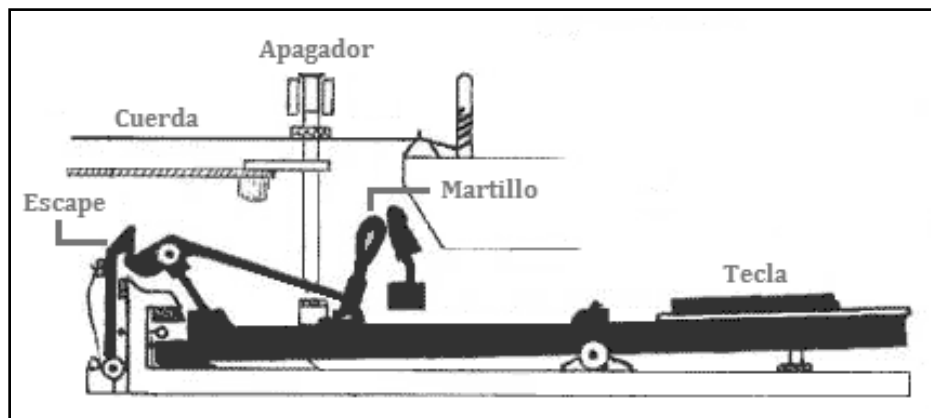
Los pianos vieneses se mantuvieron, de algún modo, fieles a su origen de clavicémbalos: eran instrumentos delicados y de sonido timbrado. Mozart fue un gran entusiasta del piano vienés [41].



**Figura I.D.19.** Piano de cola Stein (1775).



**Figura I.D.20.** Detalle del mecanismo de rodilleras en un piano de cola Stein (1775).



**Figura I.D.21.** Esquema del mecanismo de un piano de cola vienés [43].

### 2.3.1.2. Escuela inglesa

Johannes **Zumpe** (1735-1783) fue el primer representante de la Escuela Inglesa. De nacionalidad alemana como su maestro Silbermann, emigró a Londres en 1760 en donde estableció una fábrica de construcción de pianos siguiendo el modelo de mecanismo de Silbermann.

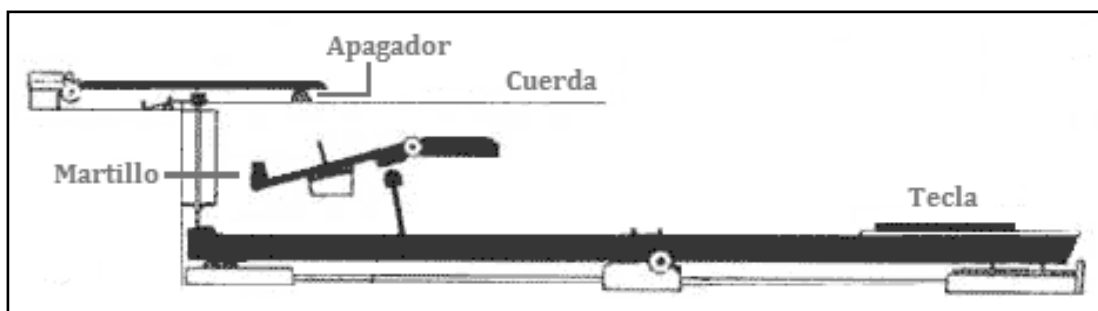
Zumpe destacó por la construcción de **pianos rectangulares** o pianos de mesa, siendo el primero en construir un piano de este tipo en Inglaterra. La creación de este tipo de piano no está claramente determinada, aunque algunos autores se la atribuyen a Silbermann. Lo cierto es que Zumpe fue el primer constructor de pianos rectangulares del que verdaderamente se tiene constancia. Esta modalidad de piano tiene un mueble de forma rectangular haciendo honor a su nombre. Sus cuerdas están en posición horizontal sobre el mecanismo de percusión de martillos como en un piano de cola aunque dispuestas en diagonal a través de la caja del instrumento. Morfológicamente se asemeja mucho al virginal, aunque con un distinto mecanismo de percusión [44].



**Figura I.D.22.** Piano rectangular de Zumpe (1766).



**Figura I.D.23.** Disposición de las cuerdas en un piano rectangular de Zumpe.



**Figura I.D.24.** Esquema del mecanismo de un piano Zumpe [43].

Se fabricaron pianos de estilo Zumpe desde 1760 hasta 1800 siendo este constructor el primero en fabricar pianos de bajo coste ayudando así a la expansión del instrumento. El piano se dio a conocer poco a poco en Inglaterra, en primera instancia de la mano de Johann Christian Bach, un prestigioso clavecinista hijo de J. S. Bach, quien dio recitales con estos pianos, ganando así el nuevo instrumento el favor de muchos de los adeptos al clave.

En 1790 **William Stoard** fabricó un gran piano vertical, antepasado del piano de pared o de “estudio” actual, que en un primer momento no despertó el gran interés que luego generaría.

El miembro más relevante y representativo de la Escuela Inglesa es el británico **John Broadwood** (1732-1812). Este constructor desarrolla el mecanismo del pianoforte entre los años 1767-1772, junto con Stoard y Americus Backers, en la llamada *gran acción* inglesa. Esta mecánica, orientada a incrementar la potencia sonora del instrumento, se impuso rápidamente en la fabricación mundial.

Estos pianos se caracterizan por ser más robustos y menos refinados que los construidos por Cristofori. Ganan en potencia sonora a través de una modificación del mecanismo de percusión: el martillo es lanzado sobre la cuerda, no directamente por el pilotín como hacía Zumpe, sino mediante una palanca intermedia puesta en movimiento por una *falsa escuadra* articulada sobre la tecla. Así, el movimiento del martillo gana en velocidad, y por tanto, se incrementa la fuerza con la que éste golpea a la cuerda. El inconveniente que genera este mecanismo es la necesidad de dejar retornar completamente la tecla a su estado de reposo para poder volver a ejecutar una nueva nota, con el consiguiente esfuerzo por parte del instrumentista. Además, los martillos son más grandes y pesados, ayudando de esta manera también al incremento de la fuerza de golpeo de éstos contra las cuerdas.

Además de la mencionada modificación del mecanismo de percusión, otros cambios relevantes que le implantaron al pianoforte fueron: unas cuerdas más largas, y por tanto, una tabla de resonancia más grande. El instrumento soportaba de esta manera más tensión así que se introdujeron las barras de hierro para reforzar la estructura del mismo. Cada vez se alejaba más de los primeros pianos y se iba adaptando a las nuevas tendencias del mundo musical, que apostaban por un instrumento más sonoro apto para ser tocado en espacios abiertos.

Broadwood comienza a fabricar pianofortes en serie y sus pianos de cola empiezan a sustituir a los clavicémbalos en Inglaterra. Uno de sus clientes más ilustres fue L. V. Beethoven, a quien regaló uno de sus pianos.



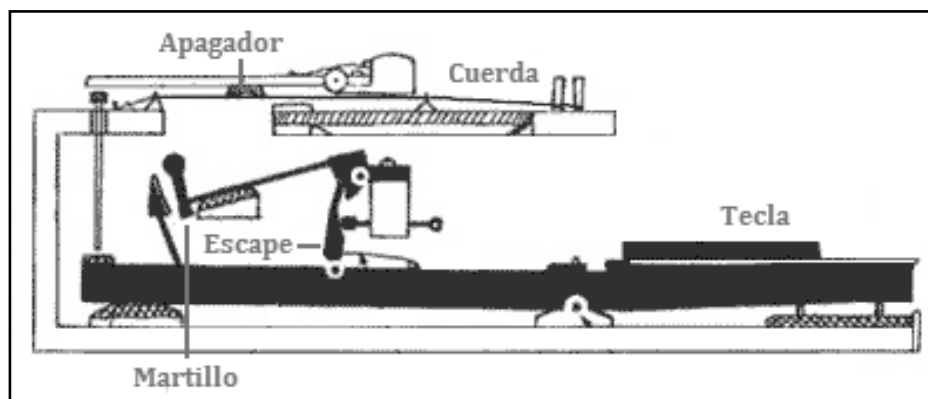
**Figura I.D.25.** Piano rectangular de Broadwood (1795).



**Figura I.D.26.** Detalle del mecanismo de percusión de un piano Broadwood (1792).



**Figura I.D.27.** Piano de cola Broadwood (1805). Incluye dos pedales: pedal una corda (izquierda) y pedal de resonancia (derecha).



**Figura I.D.28.** Esquema del mecanismo de un piano de cola Broadwood [43].

A finales del s. XVIII, varios fabricantes de la Escuela inglesa (A. Backers, A. Beyer y J. Broadwood) fueron los pioneros en incorporar el mecanismo de pedales al piano sustituyendo a las rodilleras. Durante un tiempo, los representantes de las Escuelas alemana se mostraron reacios al cambio y siguieron empleando el dispositivo de rodilleras.

### 2.3.2. Siglo XIX

En las primeras décadas del s. XIX hubo una gran actividad en la transformación del piano. El instrumento fue ampliando su tesitura y potencia sonora para adaptarse a las nuevas formaciones orquestales cada vez más numerosas.

Aparece un nuevo e importante foco de construcción en París. Entre las figuras pertenecientes a esta Escuela parisina destacan H. Pape y sobre todo **Sébastien Érard**.

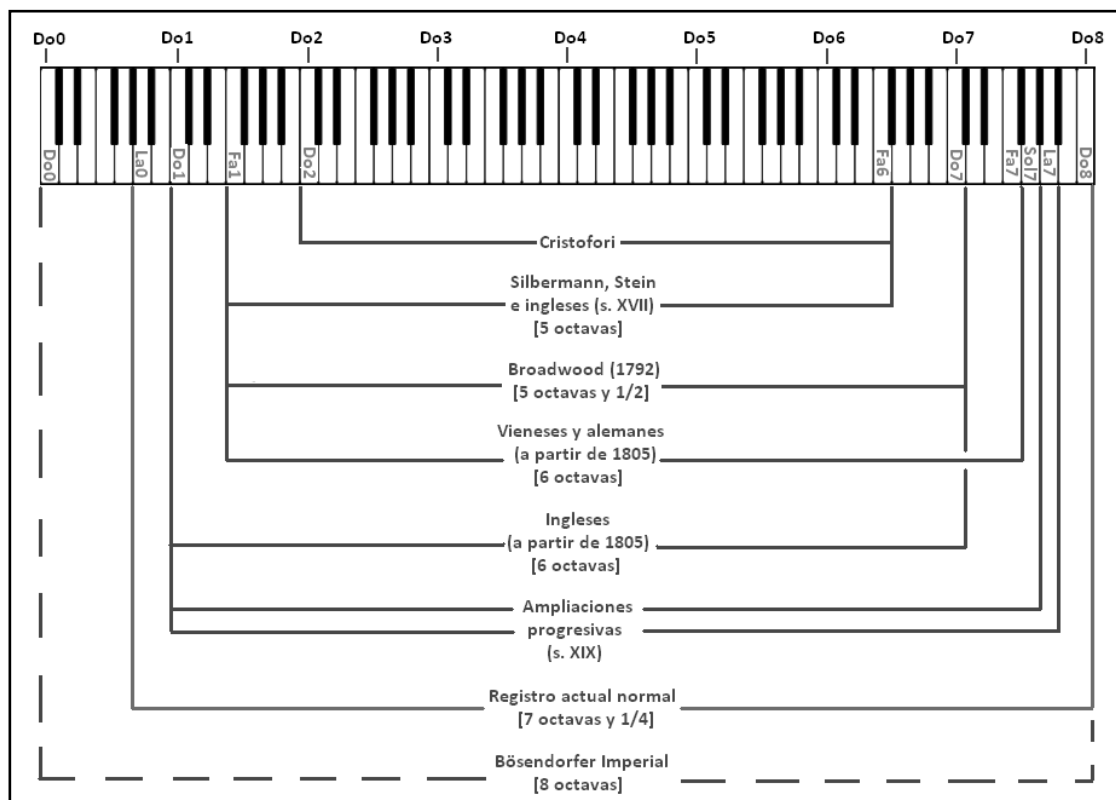


Figura I.D.29. Piano de cola Érard (1832)

Las investigaciones de este último se centraron fundamentalmente en dos aspectos:

- El aumento de la sonoridad de instrumento. Introduce una cuerda más por nota, hasta sumar tres en la mayoría del registro del piano.
- Mejorar la rapidez de repetición y respuesta del teclado. En 1808 patenta el mecanismo de simple repetición y en 1823 inventa el mecanismo de doble repetición, conocido como doble escape. Este dispositivo consiste esencialmente en un resorte que, haciendo rebotar el martillo en su fase de retorno hacia el punto de partida lo detiene a mitad del camino, quedando más cerca este de la cuerda, lo cual aligera mucho el teclado y permite además la repetición de una misma nota a grandes velocidades [45].





**Figura I.D.31.** Evolución de la extensión del registro del piano.

Hacia 1850 aparecen varias fábricas de pianos importantes en EE.UU. y Alemania que adaptan sistemas industriales de producción e invierten en investigación tecnológica de manera sistemática, hasta llegar en pocas décadas al piano actual.

El instrumento se fue reforzando progresivamente con la generalización del uso del arpa metálica y el aumento de barrajes.

Una de los últimos hitos en la evolución del instrumento fue el invento del pedal tonal por parte de los constructores franceses A. Debain y C. Montal en la década de 1860. Años más tarde, A. Steinway perfeccionó el mecanismo y en 1874 incorporó dicho pedal en la fabricación de sus pianos. Desde esa fecha ha quedado definido a tres el número de pedales que posee un piano de cola: pedal *una corda* (izquierda), pedal tonal (central) y pedal de resonancia (derecho).

## 2.4. El piano moderno

Aproximadamente a partir del año 1880 ya se puede hablar del piano moderno, tal y como se le conoce actualmente. Desde esa fecha hasta hoy en día el instrumento ha sufrido pequeñas modificaciones en su diseño pero estas no han tenido una especial trascendencia [40].

Hoy en día existen muchas compañías de fabricación de pianos. Algunas han nacido en el s. XX pero muchas sobreviven desde el s. XIX o incluso el s. XVIII. Las más destacadas y prestigiosas se concentran sobre todo en EEUU, Alemania y Japón. Acto seguido se enumeran cronológicamente las más importantes teniendo en cuenta el año de su fundación.

- Broadwood & Sons (1728) (Inglaterra).
- Bösendorfer (1828) (Austria).
- Grotrian-Steinweg (1835) (Alemania).
- Steingraeber & Söhne (1852) (Alemania).
- Steinway & Sons (1853) (EEUU).
- Blüthner (1853) (Alemania)
- Bechstein (1853) (Alemania).
- Petrof (1864) (Rep. Checa).
- Yamaha (1889) (Japón).
- Baldwin (1891) (EEUU).
- Kawai (1930) (Japón).

La mayoría de estas se fundaron a mediados del s. XIX y en la actualidad siguen siendo las marcas punteras. A principios del s. XX se incorporó con gran fuerza el mercado de producción japonés.

En los siguientes capítulos de este Anexo se tratarán en profundidad las características del piano moderno en cuanto a su anatomía, funcionamiento y propiedades acústicas.



### 3. Tipos de piano

Actualmente existen dos tipos principales de pianos acústicos: el piano de cola y el vertical o de pared, dividiéndose cada uno de ellos en subtipos atendiendo a razones de tamaño.

Los pianos de cola se caracterizan por tener una potencia sonora superior y por conferírseles una mayor calidad sonora con respecto a los verticales. Por ello, son el tipo de piano ideal para utilizarlo en salas de conciertos y eventos musicales en general. Los pianos verticales son más adecuados como pianos *de estudio*, principalmente por su menor tamaño, menor sonoridad y su inferior coste económico.

#### 3.1. Piano de cola

En este tipo de piano las cuerdas, el mecanismo de percusión y la caja del instrumento se encuentran en posición horizontal. El mueble tiene en su parte superior una tapa que se puede abrir, permitiendo así que los sonidos producidos salgan al exterior con mayor facilidad. La cantidad de radiación sonora emitida al espacio se puede variar modificando el ángulo de apertura de la tapa superior.



Figuras I.D.32 y I.D.33. Piano de cola Steinway & Sons Model D [46].

Estos pianos se clasifican según su tamaño en [40]:

- **Piano de cola *mignon*:** hasta 130 cm de longitud.
- **Piano de un 1/4 de cola:** de 131 hasta 189 cm de longitud.
- **Piano de 1/2 cola:** de 190 hasta 225 cm de longitud.
- **Piano de 3/4 de cola:** de 226 hasta 255 cm de longitud.
- **Piano de gran cola:** superiores a 256 cm de longitud.

Estas medidas, siempre referidas a la distancia entre el teclado y el final de la cola del instrumento, pueden oscilar dependiendo del fabricante, pero se suelen respetar las anteriormente citadas.

### 3.2. Piano vertical

Se caracteriza por la posición vertical de sus cuerdas, mecanismo de percusión, y caja de resonancia.



Figuras I.D.34 y I.D.35. Piano vertical Yamaha.

Atendiendo a su tamaño, se pueden distinguir cuatro tipos distintos [40]:

- **Piano vertical espineta:** su altura es menor a 98 cm.  
Es un piano de máquina indirecta, es decir, que su mecanismo está por debajo del nivel del teclado.
- **Piano vertical consola:** su altura oscila entre los 98 y los 109 cm.  
Es un piano de máquina directa, en esta ocasión, el mecanismo se encuentra al mismo nivel del teclado.
- **Piano vertical de estudio:** de 110 a 138 cm de altura.  
Es un piano de máquina directa, en el cual su mecanismo está un poco más elevado respecto al nivel del teclado.
- **Piano vertical antiguo:** suelen tener más de 140 cm de altura.  
Son pianos de máquina directa con el mecanismo aún más elevado que el piano de estudio. Se caracterizan por una gran capacidad acústica.

### 3.3. Otros pianos

A lo largo de la historia han existido otros tipos de piano. Normalmente se les ha considerado como rarezas y por tanto han tenido poco uso y difusión. Suelen tener el mismo funcionamiento que los pianos de cola o vertical, pero cada uno de ellos posee alguna característica especial. Entre ellos se destacan:

- **Piano con pedalier:** en esta clase de piano el registro grave se habilita para ser interpretado con los pies de la misma manera que en un órgano. Tuvo como antecesores al clavicordio de pedal y el clave de pedal.



Figura I.D.36. Piano de cola con pedalier.



Figura I.D.37. Piano vertical con pedalier.

- **Piano jirafa o piramidal:** creado en el año 1735, era un híbrido entre piano de cola y el piano vertical. Realmente era un piano de cola pero con la caja de resonancia colocada en vertical. La finalidad de esta disposición era reducir el espacio que ocupaba el mueble a lo largo, aunque luego resultarían instrumentos demasiado altos.



Figura I.D.38. Piano jirafa.

- **Piano transpositor:** creado en 1801 por Edward Ryley su característica especial era que podía cambiar de tonalidad al accionar una palanca.

- **Pianola o piano mecánico:** fue inventado en el año 1863 por Henri Fourneaux y, además de permitir su ejecución manual por un intérprete, es capaz de reproducir autónomamente las notas escritas en un rollo perforado utilizando dispositivos neumáticos.



**Figura I.D.39.** Pianola.

- **Piano de juguete:** creado en 1872 por Albert Schoenhut tiene la forma de un piano normal pero es de tamaño mucho más reducido con una extensión del registro entre una y tres octavas. Las teclas están conectadas a los martillos por un mecanismo similar al glockenspiel y éstos, en vez de cuerdas, percuten barras o varillas de metal fijas por uno de sus extremos. Se fabrica principalmente como un juguete pero ha sido utilizado en ocasiones en contextos musicales más serios.



**Figura I.D.40.** Piano de juguete de cola.



**Figura I.D.41.** Piano de juguete vertical.

## 4. Anatomía y funcionamiento

El piano moderno mantiene en esencia las mismas características que a finales del s. XIX en cuanto a su mecánica, morfología y partes constituyentes. Su estructura general está formada por los siguientes bloques de elementos:

- **Cuerdas:** constituyen el elemento que genera el sonido del instrumento a través de su vibración tras la excitación percusiva de un martillo.
- **Mecanismo de percusión:** está integrado por un gran número de dispositivos y elementos en funcionan en perfecto engranaje para, a grandes rasgos, cuando se pulse una tecla un martillo golpee las cuerdas correspondientes poniéndolas en oscilación y cuando esta se levante la vibración de las cuerdas sea truncada por los apagadores. Sus elementos principales son los mencionados anteriormente: los martillos y los apagadores, aunque todos son imprescindibles para el correcto funcionamiento del instrumento.
- **Teclado:** representa, junto con los pedales, el nexo de unión entre el intérprete y el instrumento. Está constituido por un conjunto de teclas, dispositivos que al pulsarlos accionan el mecanismo de percusión.
- **Caja o mueble:** actúa como medio de protección del instrumento albergando en él todo el mecanismo. Además, contiene en su interior la tabla armónica, elemento de vital importancia ya que es el encargado de transmitir y amplificar las ondas producidas por las cuerdas, y el arpa de hierro que mantiene la tensión del conjunto de cuerdas.
- **Pedales:** son unos dispositivos, generalmente tres, que son accionados con los pies y permiten cada uno de ellos la modificación de la intensidad o del timbre del instrumento en una diferente manera.

En las siguientes **figuras I.D.42** y **I.D.43** se puede observar la situación de los principales elementos del instrumento.

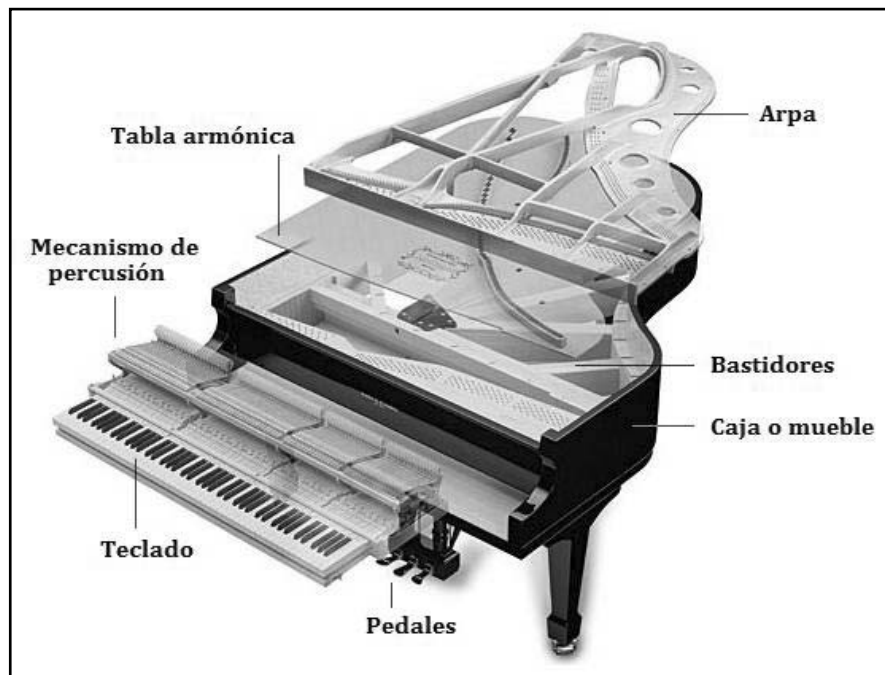


Figura I.D.42. Principales elementos del piano de cola.

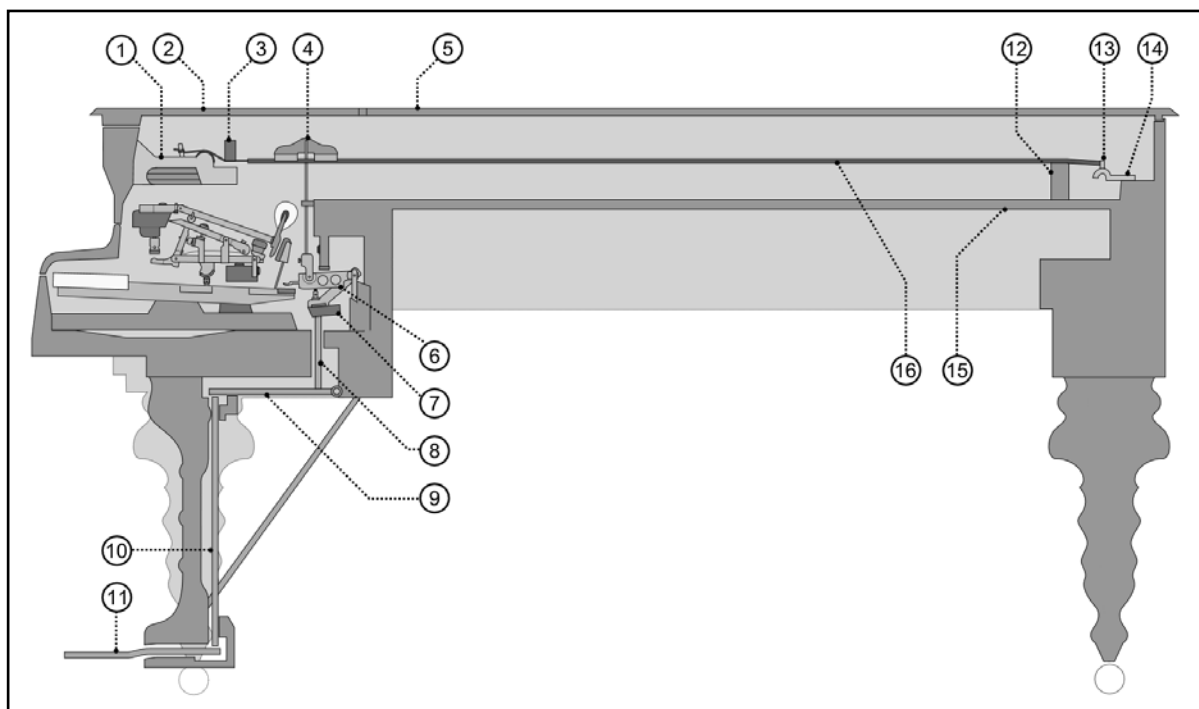


Figura I.D.43. Vista seccional de un piano de cola. (1) arpa de hierro, (2) tapa superior (parte delantera), (3) barra *capo d'astro*, (4) apagador, (5) tapa superior (parte trasera), (6) mecanismo del apagador, (7) guía *sostenuto*, (8) mecanismo de los pedales, (9) (10) barras del pedal, (11) pedal, (12) puente tonal, (13) clavijas de sujeción, (14) arpa de hierro, (15) tabla armónica, (16) cuerda.

En los sucesivos epígrafes de este Anexo se explicarán con detalle cada uno de ellos, especificando las partes que lo componen y el papel que desempeñan en el funcionamiento del instrumento.

## 4.1. Cuerdas

Las cuerdas son el elemento vibrante que produce el sonido en un piano. Se encuentran tensadas por un extremo en las clavijas de afinación y por el otro en las clavijas de sujeción y son golpeadas por un martillo.

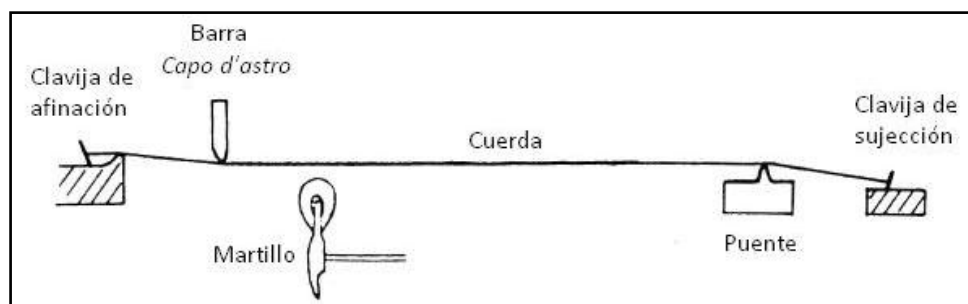
Un piano de cola tiene un total de 224 cuerdas que ejercen en conjunto una tensión que puede alcanzar las 15-20 toneladas dependiendo de las dimensiones del instrumento. Estas se reparten a lo largo del registro del instrumento disminuyendo progresivamente su longitud y grosor según se asciende por el éste. Las que están situadas en el registro grave serán más largas y gruesas que las dispuestas en el registro agudo.

El número de cuerdas por nota también varía con la zona del registro a la que pertenezca. En la región más grave se coloca una sola cuerda por nota, en el registro grave-medio hay dos cuerdas unísonas por cada nota y en el registro medio y agudo son tres cuerdas unísonas las que se ponen en vibración con cada tecla. Las cuerdas están fabricadas con acero y las más graves están entorchadas con hilos de cobre.

La longitud de las cuerdas más graves incide proporcionalmente en las dimensiones exteriores del instrumento. Por tanto, una mayor longitud de las cuerdas implica una mayor cola del piano lo que incrementa la calidad de sonido. Ocurre lo mismo con la altura de la caja del piano de pared.

### 4.1.1. Disposición y sujeción de la cuerda

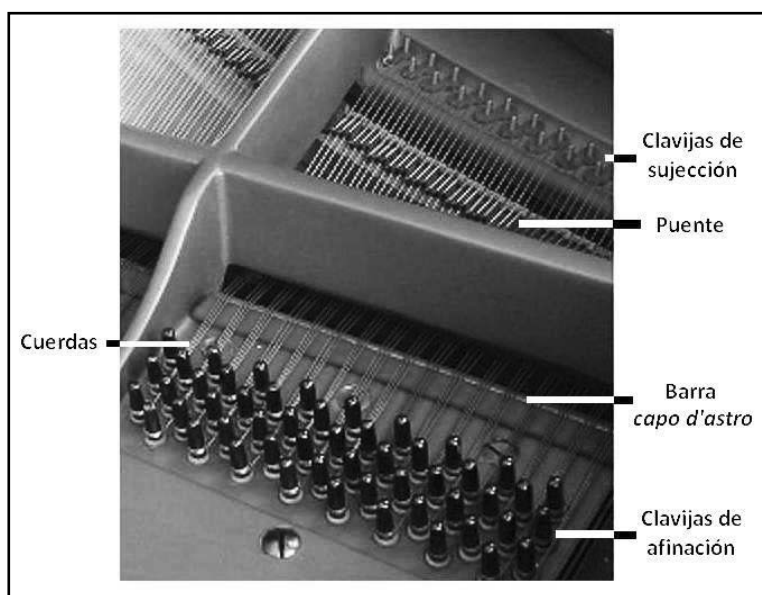
En el piano las cuerdas están tensadas en paralelo al cuerpo resonador, que en este caso lo constituye la tabla armónica. La vibración de las cuerdas se transmite hacia ella a través del puente que está situado cerca del extremo de la cuerda más alejado del teclado.



**Figura I.D.44.** Configuración esquematizada de la disposición de una cuerda en el piano [2].

“La longitud efectiva de la cuerda, es decir, la que determina su frecuencia de vibración, se mide entre la barra *capo d'astro* y el puente” [2]. Su longitud real es mayor ya que debe

continuar en ambos extremos, para ser ancladas en uno en las clavijas de afinación y en el otro en las de sujeción. Dicha longitud efectiva se puede variar regulando el grado de tensión de la cuerda en las clavijas de afinación.



**Figura I.D.45.** Detalle de la sujeción de las cuerdas agudas de un piano de cola.

#### 4.1.2. Punto de ataque o contacto

El punto de ataque o contacto es el lugar de la cuerda donde el martillo del mecanismo la percute. Dicha posición entre los extremos de la cuerda se calcula como una proporción de la longitud de la misma. Esta proporción no es la misma para todas las notas de instrumento sino que mantiene una progresión de la nota más grave a la más aguda [47].

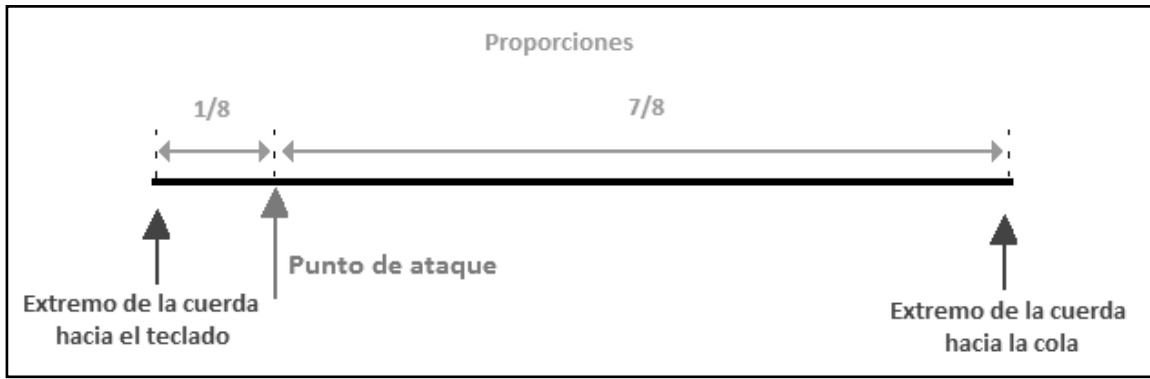
En el piano moderno las proporciones son estas:

Proporción	Rango de notas
1/8	La <sub>0</sub> - Si <sub>4</sub>
1/9	Do <sub>4</sub> - Si <sub>4</sub>
1/10	Do <sub>5</sub> - Si <sub>5</sub>
1/12	Do <sub>6</sub> - Si <sub>6</sub>
1/14	Do <sub>7</sub> - Do <sub>8</sub>

**Tabla I.D.1.** Proporciones del punto de ataque en las cuerdas del piano [47].

El hecho de que una cuerda tenga el punto de ataque a una proporción de 1/8 significa que, dividiendo la cuerda en 8 partes, este se halla en el lugar de la cuerda que dista una parte hacia el extremo del teclado y siete hacia el otro, tal y como se observa en la siguiente figura.





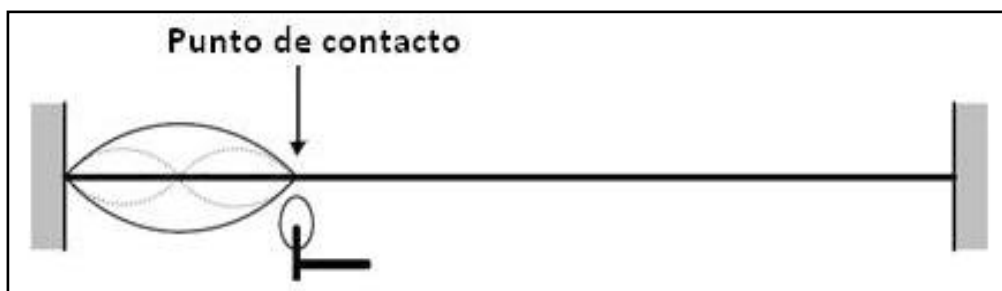
**Figura I.D.46.** Punto de ataque en una proporción de  $1/8$  de cuerda.

Al movernos a las regiones más agudas del instrumento, el punto de ataque en la cuerda se encuentra cada vez más próximo al extremo del teclado.

“El punto de ataque es de vital importancia para el sonido. Existen diferentes teorías respecto a la idoneidad de su ubicación, sin embargo, tradicionalmente el fabricante se ha guiado más por criterios empíricos que teóricos”. Fundamentalmente, el punto de ataque influye en dos aspectos [47]:

- a) En la producción de los armónicos naturales de la cuerda, pudiéndose potenciar o atenuar determinados armónicos según la posición del punto de ataque.

En general, el punto en el que una cuerda es pulsada coincide con un punto nodal de cualquier modo de vibración de la misma, ese modo no será excitado. Si por ejemplo se pulsa una cuerda a  $1/8$  octavo de su longitud, el modo  $8^{\circ}$  no será excitado, como tampoco sus múltiplos enteros: el  $16^{\circ}$ ,  $24^{\circ}$ , etc. Sin embargo, se ha demostrado que este hecho en el piano no es del todo válido, ya que en este instrumento las cuerdas no son pulsadas sino percutidas. La percusión tiene lugar durante el tiempo de contacto del martillo con las cuerdas. Este es breve pero suficientemente largo para permitir la formación de ondas estacionarias armónicas en el segmento más corto de la cuerda (el más cercano al teclado) [2].



**Figura I.D.47.** Ondas estacionarias producidas en el tiempo de contacto del martillo en la cuerda [2].

Dichas ondas estacionarias constituirán la serie armónica de una nota de frecuencia 8 veces superior a la de la cuerda total, que son precisamente los armónicos supuestamente eliminados (el 8º, 16º, 24º, etc.). Al separarse el martillo de la cuerda, todos ellos se propagarán al resto de la cuerda, y el resultado final será que todos los modos de vibración estarán presentes en la cuerda. Por ello, el tiempo de contacto del martillo con las cuerdas es de vital importancia puesto que cuanto mayor sea éste, menor serán las amplitudes de los armónicos múltiplos de 8, ya que las ondas estacionarias en la parte corta de la cuerda habrán perdido más energía antes de propagarse [2].

b) En el tiempo de permanencia del martillo sobre la cuerda después del impacto.

“La cuerda es más rígida al ataque del martillo en sus extremos que en el centro, de manera que cuanto más cerca de los extremos ataque el martillo a la cuerda mayor será la fuerza de rebote y por lo tanto más breve el contacto entre ambos. Esto junto con la dureza del propio martillo afecta decisivamente en el sonido” [47].

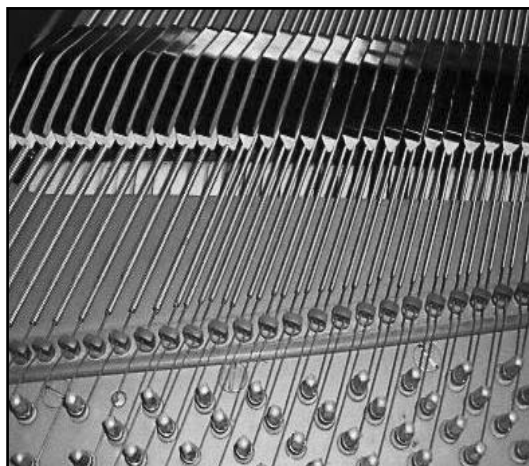
#### 4.1.3. Disposición de las cuerdas a lo largo del registro del instrumento

##### 4.1.3.1. Número de cuerdas por nota

El número de cuerdas unísonas por nota (afinadas a la misma frecuencia) varía según la zona del registro del instrumento en la que ésta se encuentre. En un piano moderno, se distinguen tres regiones: una zona donde hay una sola cuerda por nota, otra, donde se colocan dos cuerdas unísonas por nota y, finalmente, el resto del registro posee tres cuerdas unísonas por nota.

El número de notas que abarque cada región puede variar ligeramente según el tipo de piano. En el piano de gran cola *Steinway & Sons D-274* los límites de dichas regiones son las siguientes:

- Una cuerda por nota: abarca desde la nota La0 hasta Mi1 (**figura I.D.48**).
- Dos cuerdas por nota: comprende desde Fa1 hasta La1 (**figura I.D.48**).
- Tres cuerdas por nota: incluye todas las notas entre Sib1 y Do8, ambas inclusive (**figura I.D.49**).



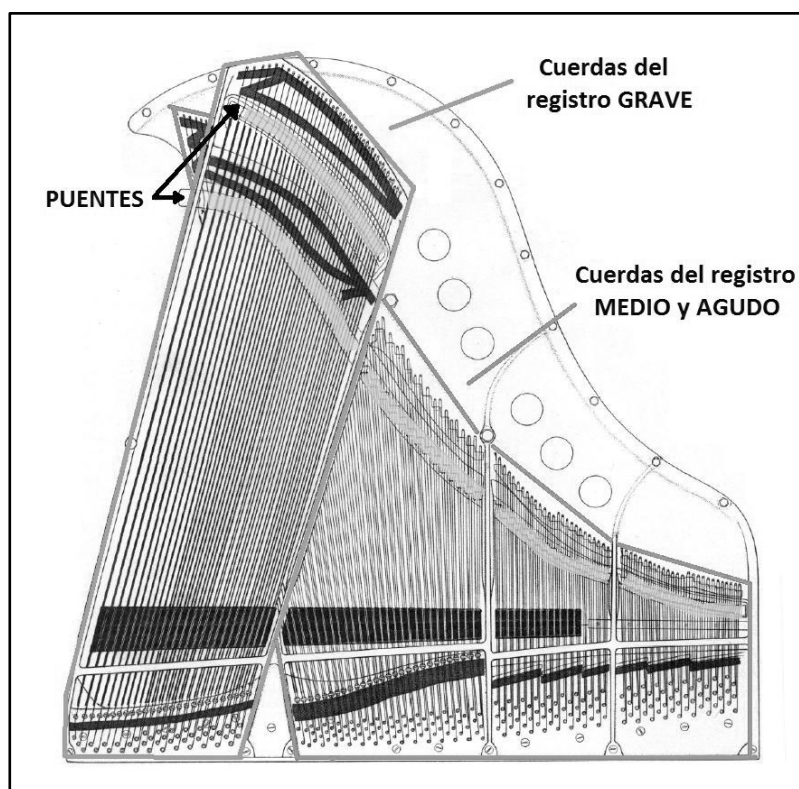
**Figura I.D.48.** Detalle de las cuerdas graves de un piano de cola (cuerdas individuales y dobles).



**Figura I.D.49.** Detalle de las cuerdas agudas de un piano de cola (triples cuerdas).

#### 4.1.3.2. Sobreencordado

Otra característica importante en la disposición de las cuerdas en el instrumento es el sobreencordado. Este consiste en el cruce de las cuerdas más graves por encima de las cuerdas del registro medio, conllevando la adición de un nuevo puente para las cuerdas graves independiente al de las medias y agudas. La finalidad principal del sobreencordado es disminuir el tamaño del mueble del instrumento. Sin la existencia del cruce de cuerdas el piano sería mucho más largo y ancho.



**Figura I.D.50.** Sobreencordado de las cuerdas de un piano de gran cola [2].

#### 4.1.4. Propiedades físicas de las cuerdas

Las propiedades físicas de las cuerdas en tensión fijas por ambos extremos, comunes a todos los instrumentos de cuerda, ya han sido detalladas en el **Anexo I.C.** Por ello, en este apartado únicamente se describirán las características propias de las cuerdas del piano.

##### 4.1.4.1. Frecuencia

Cada cuerda del piano está afinada a la frecuencia de la nota correspondiente. Dichas frecuencias se encuentran reflejadas en la **Tabla I.D.2** para todo el registro del instrumento.

Para obtener la frecuencia deseada en una cuerda, hay que proporcionarle los valores adecuados de tensión, densidad, grosor y longitud.

Las frecuencias señaladas en la tabla anteriormente citada corresponden a una afinación de temperamento igual. Sin embargo, actualmente en la práctica impera una afinación estirada. Esta consiste en la ligera modificación de la frecuencia de las notas del piano hacia valores más altos conforme se asciende en la tesitura del instrumento, o más bajos cuando se desciende hacia el registro grave del mismo. La finalidad de la afinación estirada es lograr una mejor calidad sonora del instrumento, teniendo en cuenta la inarmonía (ver **epígrafe 4.1.5** del presente Anexo) presente en el mismo.

Tecla del piano	Octava	Nota musical	Frecuencia [Hz]	Tecla del piano	Octava	Nota musical	Frecuencia [Hz]
1	0	La	27,5	45	4	Fa	349,2
2		La#/Sib	29,1	46		Fa#/Solb	370,0
3		Si	30,9	47		Sol	392,0
4	1	Do	32,7	48		Sol#/Lab	415,3
5		Do#/Reb	34,6	49		La	440,0
6		Re	36,7	50		La#/Sib	466,2
7		Re#/Mib	38,9	51		Si	493,9
8		Mi	41,2	52	Do	523,3	
9		Fa	43,7	53	Do#/Reb	554,4	
10		Fa#/Solb	46,2	54	Re	587,3	
11		Sol	49,0	55	Re#/Mib	622,3	
12	Sol#/Lab	51,9	56	Mi	659,3		
13	La	55,0	57	Fa	698,5		
14	La#/Sib	58,3	58	Fa#/Solb	740,0		
15	Si	61,7	59	Sol	784,0		
16	2	Do	65,4	60	Sol#/Lab	830,6	
17		Do#/Reb	69,3	61	La	880,0	
18		Re	73,4	62	La#/Sib	932,3	
19		Re#/Mib	77,8	63	Si	987,8	
20		Mi	82,4	64	Do	1.046,5	
21		Fa	87,3	65	Do#/Reb	1.108,7	
22		Fa#/Solb	92,5	66	Re	1.174,7	
23		Sol	98,0	67	Re#/Mib	1.244,5	
24	Sol#/Lab	103,8	68	Mi	1.318,5		
25	La	110,0	69	Fa	1.396,9		
26	La#/Sib	116,5	70	Fa#/Solb	1.480,0		
27	Si	123,5	71	Sol	1.568,0		
28	3	Do	130,8	72	Sol#/Lab	1.611,2	
29		Do#/Reb	138,6	73	La	1.760,0	
30		Re	146,8	74	La#/Sib	1.864,7	
31		Re#/Mib	155,6	75	Si	1.975,5	
32		Mi	164,8	76	Do	2.093,0	
33		Fa	174,6	77	Do#/Reb	2.217,5	
34		Fa#/Solb	185,0	78	Re	2.349,3	
35		Sol	196,0	79	Re#/Mib	2.489,0	
36	Sol#/Lab	207,7	80	Mi	2.637,0		
37	La	220,0	81	Fa	1.793,8		
38	La#/Sib	233,1	82	Fa#/Solb	2.960,0		
39	Si	246,9	83	Sol	3.136,0		
40	4	Do (central)	261,6	84	Sol#/Lab	3.322,4	
41		Do#/Reb	277,2	85	La	3.520,0	
42		Re	293,7	86	La#/Sib	3.729,3	
43		Re#/Mib	311,1	87	Si	3.951,1	
44		Mi	329,6	88	Do	4.186,0	

Tabla I.D.2. Frecuencias de las notas musicales correspondientes a cada tecla del piano.

#### 4.1.4.2. Tensión

Por lo general, la tensión de una cuerda de un piano oscila entre los 70 y 100 Kg dependiendo de las dimensiones del instrumento. En conjunto, la tensión de las cuerdas de un piano de cola puede llegar a las 25 toneladas y en uno vertical a las 14 toneladas [47].

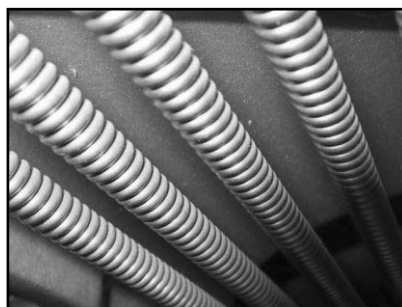
La tensión de las cuerdas ha aumentado a lo largo de la evolución del instrumento estando supeditada al material empleado en la fabricación de las cuerdas así como a las características de la estructura que soporta toda la tensión del cordaje. En los pianos anteriores al s. XIX la tensión general del cordaje no solía superar las 5 toneladas. La adopción del acero para la construcción de las cuerdas conllevó que la tensión pudiera ser incrementada respecto a la de las anteriores cuerdas de latón o alambre. Por otro lado, la introducción del arpa metálica también fue necesaria para posibilitar el aumento de la tensión de las cuerdas debido a su capacidad de soportar valores más altos de tensión respecto a las anteriores estructuras de madera.

Esta propiedad de las cuerdas, que debe ser regular en todo el registro del instrumento, influye en la potencia sonora del piano así como en la propiedad de inarmonicidad que poseen estas, lo cual determina la producción de armónicos y la afinación del instrumento.

#### 4.1.4.3. Material

Actualmente las cuerdas del piano se fabrican de acero con un contenido de carbono del 1%. Hay una extensa variedad de calidades de cuerda dependiendo de su proceso de fabricación así como de su contenido de carbono. La calidad de las cuerdas condicionará las propiedades sonoras del instrumento y también la resistencia de estas a su ruptura, sobre todo la de las cuerdas más agudas que por su menor calibre son las más propensas a partirse [47].

Por lo general, las cuerdas simples y dobles que constituyen el registro grave están envueltas en un entorchado de cobre (**figura I.D.51**), que es más grueso conforme la cuerda es más grave, pudiendo existir un doble entorchado en el registro más grave del instrumento.



**Figura I.D.51.** Detalle del entorchado de las cuerdas del registro grave del piano.

#### 4.1.4.4. Grosor y longitud

Todas las cuerdas del piano no tienen el mismo grosor ni la misma longitud, estas son más gruesas y largas conforme se desciende en el registro del instrumento.

Si ya se conoce el material a utilizar en la fabricación en las cuerdas (y por tanto su densidad), las frecuencias a las que estas deben vibrar y la fuerza a las que se tensará (uniforme para todo el registro del instrumento), el constructor puede calcular la longitud y el diámetro que corresponde asignar a cada nota del piano empleando de la fórmula matemática de Taylor deducida a partir de la expresión general de la frecuencia de las cuerdas vibrantes:

$$f_n = \frac{nc}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{d\pi r^2}} \rightarrow f = \text{Constante} \cdot \frac{\sqrt{T}}{d \cdot L} \rightarrow f = \text{Constante} \cdot \frac{1}{d \cdot L}$$

Según la fórmula de Taylor [2], tanto si aumentamos la longitud de cuerda como si aumentamos su diámetro (o ambos), la frecuencia del sonido disminuye. Por esta razón, las cuerdas más gruesas y largas producen sonidos más graves, mientras que las cuerdas más finas y cortas producen sonidos más agudos.

A la hora de establecer el grosor y longitud de las cuerdas los constructores se enfrentan a un gran desafío: lograr longitudes de cuerda no demasiado grandes para que el instrumento tenga unas dimensiones razonables. Para ello, van incrementando el diámetro de las cuerdas conforme se desciende en el registro del instrumento. En la región más grave es necesario el empleo de un caso especial de cuerda: el bordón. Este se construye entorchando hilo de cobre sobre la cuerda de acero consiguiendo de esta manera el grosor de cuerda necesario sin aumentar en exceso la rigidez de esta y evitando un grado de enarmonía inaceptable. En los pianos modernos de cola los bordones se suelen emplear para las primeras 20 notas del instrumento.

Para un piano de cola los calibres de las cuerdas sin bordones están estandarizados, oscilando estos desde los 0,775 mm de la cuerda más fina hasta los 1,175 mm correspondientes a la cuerda más gruesa en saltos de 0,025 mm. Por lo general, los calibres se reparten en grupos de 4, 6 u 8 notas para cada diámetro [47].

#### 4.1.4.4.1. Factor de encordado

Se denomina factor de encordado (FE) a la proporción entre las longitudes ( $L$ ) de las cuerdas de octavas sucesivas. Esta proporción dependerá a su vez de la relación entre las densidades ( $\mu$ ) y las tensiones ( $T$ ) de dichas cuerdas [2].

Operando a partir de la frecuencia fundamental de una cuerda y teniendo en cuenta que  $f_2$  es la frecuencia de una nota una octava más aguda que una nota de frecuencia  $f_1$ , es decir:  $f_2 = 2f_1$ , se obtiene:

$$f_1 = \frac{1}{2L_1} \sqrt{\frac{T_1}{\mu_1}}$$

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 = \frac{L_1}{L_2} \sqrt{\frac{T_2 \mu_1}{T_1 \mu_2}} \rightarrow 2 = \frac{L_1}{L_2} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot \frac{d_1}{d_2}$$

Siendo:

$$\frac{L_1}{L_2} = \text{factor de encordado (FE)}.$$

$$\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = \text{factor de tensión (FT)}.$$

$$\frac{d_1}{d_2} = \text{factor de diámetro (FD)}.$$

El factor de encordado (FE) puede enunciarse en función al factor de tensión (FT) y al factor de diámetro (FD):

$$FE = 2 \cdot \frac{\sqrt{FT}}{FD}$$

En el piano, el factor de tensión (FT) es aproximadamente 1,2 y el factor de diámetro (FD) aproximadamente 1,15 obteniéndose un factor de encordado (FE) con valor cercano a 1,9.

Se considera que la longitud ideal para la cuerda del Do4 debe estar comprendida entre 60 y 65 cm. Tomándola como referencia, se obtiene la siguiente relación entre la frecuencia en octavas y la longitud de la cuerda medida en metros:

$$L = FE^{4-oct} \cdot L_{Do4}$$



Donde:

$oct$  = número de octava.

$L_{oct4}$  = longitud del Do4.

Al aplicar la anterior ecuación, en la región de los graves resultarían cuerdas de longitudes demasiado grandes, por ejemplo, la cuerda correspondiente a la nota Do1 mediría unos 4 metros y medio. Estas longitudes son impracticables, por tanto en el registro grave del instrumento se le aplica una corrección al factor de encordado. Este consiste en el aumento progresivo de FD, es decir, aumentar el diámetro de las cuerdas conforme se desciende por el registro mediante el entorchado en cobre de las cuerdas.

El grado de modificación del FE depende del tipo y tamaño del instrumento. En la figura I.D.52 se muestran las longitudes de las cuerdas a lo largo del registro del piano para dos factores de encordado distintos, así como las obtenidas una vez aplicada en la región grave la corrección anteriormente citada.

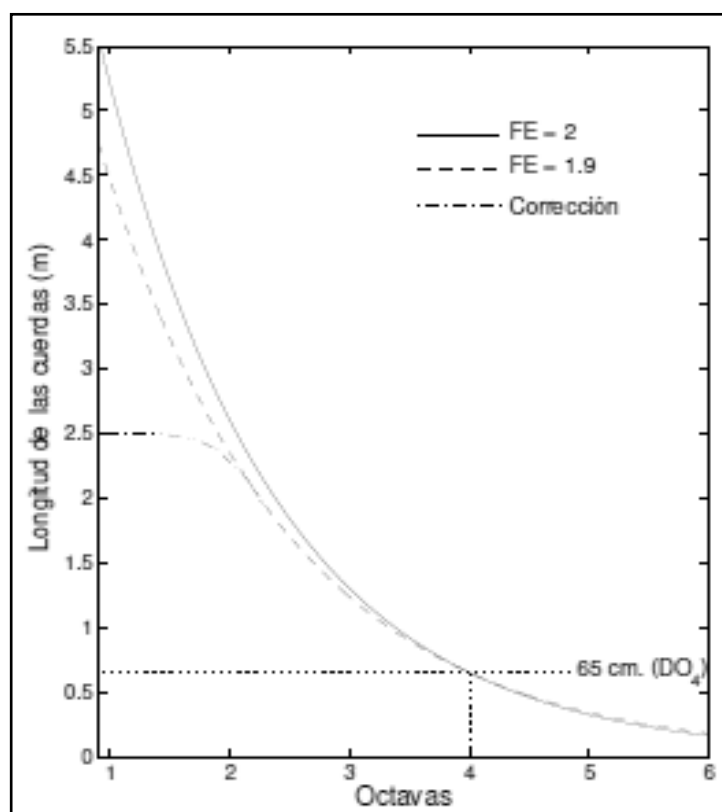


Figura I.D.52. Longitudes de las cuerdas a lo largo del registro del piano [2].

#### 4.1.5. Inarmonía

En la mayoría de los instrumentos cordófonos los sobretonos que se producen son armónicos, como corresponde al caso de una cuerda ideal, esto es, una cuerda fija en ambos extremos y con una elasticidad infinita. Aunque realmente toda cuerda tiene un cierto grado de rigidez, en estos casos esta se desprecia.

En el caso del piano, la gran tensión a la que están sometidas sus cuerdas las convierte en altamente rígidas y por tanto se consideran cuerdas no ideales. El efecto de la rigidez hace que la cuerda de un piano se comporte como un medio dispersivo, no propagándose en ella todas las ondas sonoras a la misma velocidad. La velocidad de propagación de estas se incrementa conforme aumenta la frecuencia, lo que significa, en un sonido musical, que los sobretonos superiores se propagan a mayor velocidad que el modo fundamental y los sobretonos inferiores. Esto conlleva que la frecuencia de los armónicos se incremente respecto a la teórica que deberían tener, produciendo el efecto de la inarmonía. Si este se presenta en un alto grado se considera desagradable a la escucha [2].

La frecuencia del parcial  $n$ -ésimo para una cuerda rígida viene proporcionada por la siguiente expresión:

$$f_n = f_o n \sqrt{1 + Bn^2}$$

Siendo:

$f_o$  = frecuencia fundamental.

$n$  = número del parcial.

**$B$  = coeficiente de inarmonía.** Representa el grado de inarmonicidad y es directamente proporcional a la tensión ( $T$ ) aplicada y a la proporción diámetro /longitud de la cuerda ( $d/l$ ).

Por tanto, se comprueba la inarmonía no afecta de igual manera a todo el registro del piano. Esta es mínima en la región central y crece hacia ambos extremos del instrumento. En el caso de altas frecuencias este efecto no es especialmente preocupante ya que los parciales superiores se adentran en la región de frecuencias inaudibles. Sin embargo, es fundamental reducir la inarmonía en el registro grave ya que todos los parciales relevantes de ellas están dentro del espectro de audiofrecuencias. Hay que recordar que una de las características fundamentales del espectro de las notas graves del piano es la menor amplitud de su frecuencia fundamental de vibración respecto a la de sus armónicos medios. En estos casos el oído reconstruye la altura del sonido basándose en las diferencias existentes entre los parciales. Si estos son armónicos, será fácil la reconstrucción del sonido, pero si estos

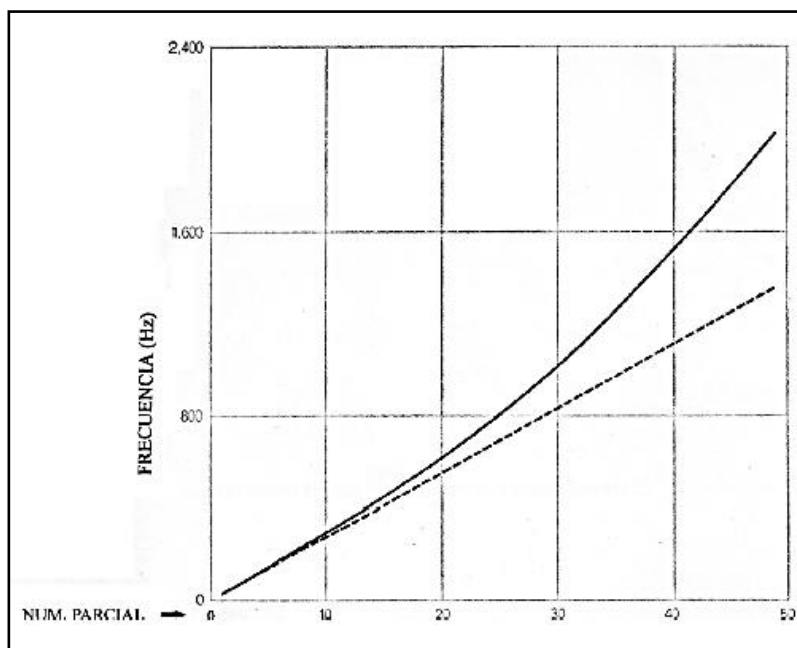
presentan un alto coeficiente de inarmonicidad la altura de la nota será confusa y el sonido se considerará más desagradable.

En el registro grave la inarmonía aumenta por dos motivos principales:

- Las cuerdas más graves tienen una mayor relación diámetro/longitud.
- El entorchado de cobre provoca reflexiones adicionales de la onda en los puntos donde esta termina, es decir, cerca de la barra *capo d'astro* y del puente.

Al igual que sucede en la región de los graves, en el registro agudo el factor de inarmonía también crece. La corta longitud de las cuerdas y la alta tensión que estas soportan hacen que se comporten casi como barras.

En general, la inarmonía presente en un piano hace subir un  $1/3$  de semitono al armónico número 10 y un tono entero al armónico número 20, coincidiendo el parcial 15 de una nota del piano con el armónico 16 en el caso de una cuerda ideal, tal y como se muestra en la **figura I.D.53**.



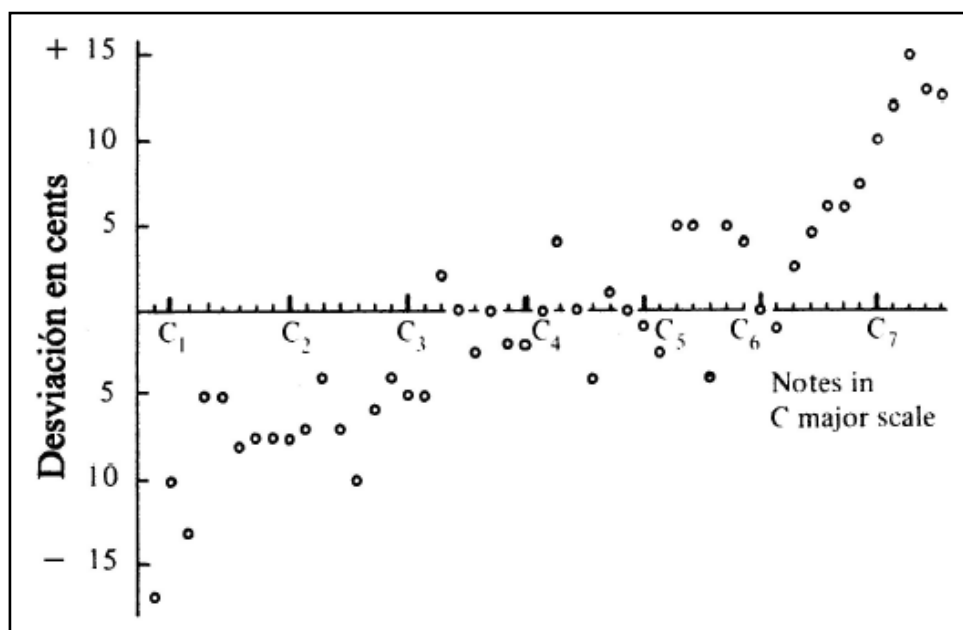
**Figura I.D.53.** Desviación entre las frecuencias de los parciales de una nota del piano (línea continua) y las de la serie armónica teórica correspondiente a la misma altura sonora para una cuerda ideal (línea discontinua) [2].

Los fabricantes de piano han tenido en cuenta este fenómeno y han aplicado varias estrategias para reducir la inarmonía hasta valores aceptables. Entre ellas destacan:

- La disminución del grosor de las cuerdas o el aumento de la longitud de onda de las mismas. Para lograr una disminución eficaz del grosor de las cuerdas se emplea la técnica del entorchado. Además, con el objetivo de incrementar la longitud de onda de estas, se persigue un mayor tamaño del instrumento que permita encajar cuerdas más largas dentro de su caja de resonancia.
- La elección de un material flexible, esto es, con una fuerza de flexión baja, así como el aumento de la fuerza de tensión hasta conseguir que esta última sea mucho mayor que la fuerza de flexión.

Actualmente, la inarmonía presente en los pianos no se elimina completamente debido a que varios estudios han demostrado que una leve presencia de esta es deseable puesto que le aporta una mayor riqueza y calidez al timbre del instrumento.

La inarmonía tiene consecuencias en la afinación del instrumento. Actualmente impera una afinación estirada (**figura I.D.54**), en detrimento de la afinación de temperamento igual.



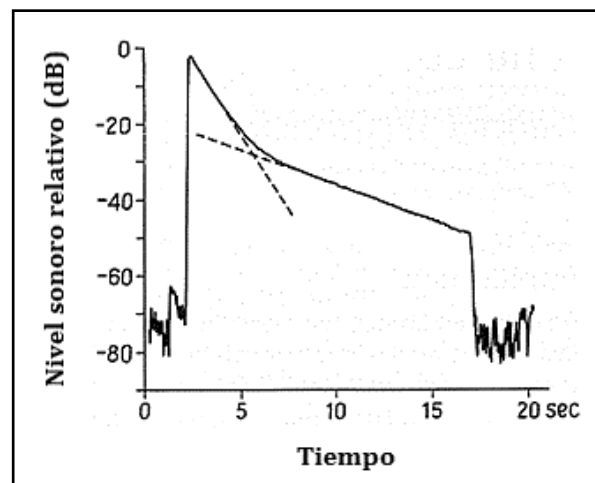
**Figura I.D.54.** Afinación estirada a lo largo del registro del piano [2].

La afinación estirada consiste en retocar la afinación de las notas agudas elevando ligeramente sus frecuencias y la de las más graves disminuyendo sus frecuencias. De esta manera se logra que los sobretonos de las notas graves tengan la misma frecuencia que las notas agudas fundamentales, y “el piano está afinado consigo mismo” [2]. En la figura anterior se aprecia una desviación total de unos 30 cents entre las notas extremas del registro del instrumento.

#### 4.1.6. Efecto de la doble caída en la envolvente de las notas del piano

El sonido del piano es producto de vibraciones libres puesto que una vez se ha aportado energía a la cuerda mediante la percusión del martillo esta se deja vibrar en libertad. Por lo tanto, la envolvente de un sonido producido por este instrumento carecerá de zona de mantenimiento y vendrá determinada por la forma del período de caída en el cual la cuerda va perdiendo la energía [2].

Al analizar la evolución temporal de la amplitud de las notas del piano (siempre partiendo de la base de que se mantiene pulsada la tecla hasta que el sonido se extinga, es decir, sin considerar el efecto de los apagadores) se obtienen gráficas semejantes a la de la **figura I.D.55** en la cual se observan dos fases en la caída del sonido.



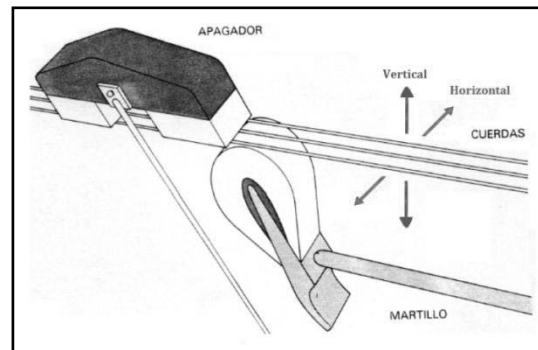
**Figura I.D.55.** Efecto de la doble caída en el tiempo de la envolvente de la nota Mi3 = 311 Hz [8].

La primera de ellas, que recibe el nombre de sonido inmediato, tiene poca duración y una tasa de atenuación elevada. La segunda constituye la resonancia, un período más largo con una atenuación del nivel de presión acústica más progresiva. A este fenómeno se le conoce como doble caída o doble atenuación y es una característica acústica prácticamente exclusiva del piano.

La explicación a este particular comportamiento del sonido del piano se alcanzó en el año 1977 con la publicación por parte de Gabriel Weinreich del artículo “The coupled motion of piano strings” en el diario de la Sociedad Americana de Acústica [8]. La principal conclusión que se extrae de dicho documento es que la doble caída de las notas en el piano tiene fundamentalmente su origen en la utilización de dobles y triples cuerdas, aunque también influye la existencia de dos direcciones de vibración o polarizaciones en las cuerdas.

#### 4.1.6.1. Cuerda con dos direcciones de vibración

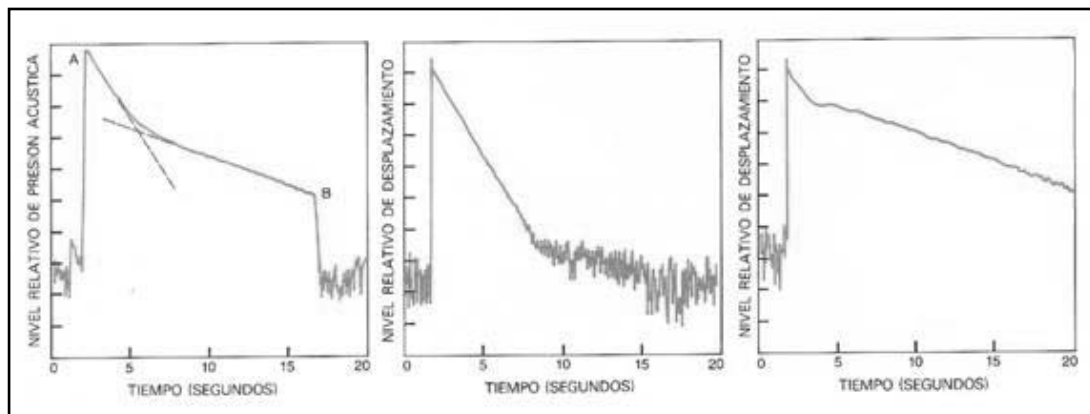
La cuerda no solo se mueve en dirección vertical (desde el punto de vista de un piano de cola), sino que, debido a imperfecciones en la superficie del martillo, adquiere una cierta componente horizontal (**figura I.D.56**).



**Figura I.D.56.** Componentes vertical y horizontal de las vibraciones de una cuerda de un piano [27].

Inmediatamente después del impacto del martillo en la cuerda la componente vertical de su movimiento es más de diez veces superior a la componente horizontal. Sin embargo, por la forma en que las cuerdas están unidas al puente, la componente vertical se atenúa a mayor velocidad ya que el puente cede más al movimiento vertical. Por tanto, transcurrido un tiempo inicial, únicamente permanece la componente horizontal, más débil y de atenuación más lenta, lo que contribuye a la resonancia.

En la **figura I.D.57** se representa, por una parte, el nivel de presión acústica en función del tiempo para una sola cuerda vibrante del piano y, por otro, el movimiento vertical de la cuerda que da lugar al sonido inmediato y el horizontal que origina la resonancia.



**Figura I.D.57.** Envolvente de una cuerda del piano de cola (izquierda). La división de la escala vertical corresponde a 10 dB. En el instante A se pulsa la tecla y el martillo percute la cuerda y en el B la tecla se suelta y, por tanto, el apagador detiene la vibración de la cuerda. La gráfica queda dividida en dos segmentos rectilíneos, donde las líneas discontinuas constituyen sus extensiones. Movimiento vertical de la cuerda (centro) y oscilación horizontal de la misma (derecha) [27].

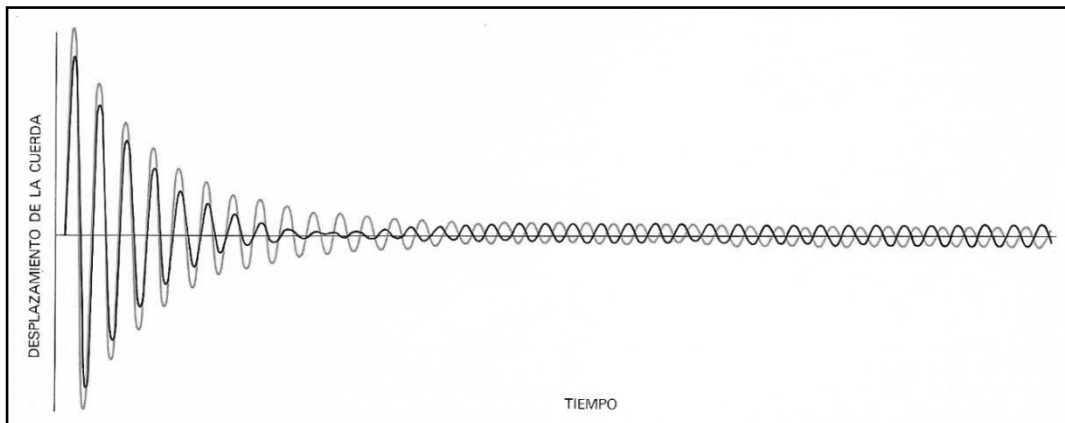
No existe un acuerdo entre los investigadores acerca de la influencia de las polarizaciones en la doble caída de las envolventes de las notas del piano. Mientras algunos autores como Weinreich afirman que esta es alta, otros niegan incluso que esta influencia exista [2].

#### 4.1.6.2. Cuerdas múltiples perfectamente afinadas

Para simplificar el estudio se consideran dos cuerdas afinadas exactamente a la misma frecuencia acopladas a través del puente del instrumento. El puente conecta las cuerdas con la tabla armónica transmitiendo la energía hacia ella desde donde es radiada al aire.

En el caso de que las cuerdas vibren en fase existirá una gran transferencia de energía entre estas y la tabla armónica, el movimiento de la cuerda durará poco tiempo, provocando un sonido corto y de gran intensidad. En cambio, si el traspaso de energía es pequeño, como sucede en el caso de que las cuerdas estén en oposición de fase, la energía se disipará más lentamente, resultando un sonido más largo y con menor intensidad.

La evolución temporal de las amplitudes de dos cuerdas acopladas en vibración se representa en la siguiente **figura I.D.58**. Hay que tener en cuenta que la superficie de contacto del martillo, que nunca es perfectamente lisa, provoca que en el impacto sobre las cuerdas del piano, una de ellas tenga una amplitud ligeramente superior a la otra.



**Figura I.D.58.** Vibración de dos cuerdas acopladas perfectamente afinadas [27].

En un primer momento, las dos cuerdas vibran en fase y sus movimientos se suman en el puente. En este período de sonido inmediato, la transferencia de la energía a la tabla armónica será rápida y, por tanto, también la atenuación de los movimientos de las cuerdas. Cuando la amplitud de la cuerda de menor amplitud inicial (*de color negro en la figura*) llega a ser nulo, la cuerda de mayor amplitud inicial (*representada en la figura de color rosa*) mueve al puente y

este a su vez induce el movimiento de la cuerda que ya había llegado a detener su vibración. A partir de este momento la diferencia de fase total entre las cuerdas, ambas nuevamente en vibración, será de  $1/2$  ciclo, estando ambas en contrafase. Se inicia así un nuevo periodo denominado resonancia en el cual las amplitudes de las dos cuerdas se acercan asintóticamente, el movimiento del puente es mucho menor y la atenuación se alarga en el tiempo [27].

La explicación del cambio de fase de la vibración de la cuerda de menor amplitud (*color negro*) reside en el acoplamiento entre las cuerdas y el puente que constituye un apoyo resistivo. En este tipo de apoyo siempre hay una diferencia de fase de  $1/4$  de ciclo entre el movimiento de una cuerda (*línea rosa*) y el que esta induce sobre el puente. De la misma manera, si el puente en movimiento empuja a una cuerda inicialmente en reposo (*línea negra*), la diferencia de fase será también de  $1/4$  de ciclo [2].

#### 4.7.3. Cuerdas múltiples con desafinaciones entre ellas

Al afinar las cuerdas múltiples de una nota cualquiera del piano resulta casi imposible lograr una perfecta afinación entre estas. Habitualmente existen unos pocos cents de diferencia entre las frecuencias de cada una. Al igual que sucede con la inarmonía, desde el punto de vista físico estas ligeras desafinaciones puede parecer en primera instancia indeseables, pero la práctica musical ha demostrado que no es así. La desafinación también contribuye a la doble caída del sonido de una nota tocada en un piano.

Después del impacto del martillo las dos cuerdas acopladas vibran en fase dando lugar al sonido inmediato. Debido a la ligera desafinación existente entre ellas, tendrá lugar un desplazamiento de fase de una con respecto a la otra. Cuando este desfase toma valores cercanos al  $1/2$  ciclo de una de las frecuencias los movimientos prácticamente se anularán en el puente y se alargará la caída del sonido, dando lugar a la resonancia.

La cuerda que está en fase ve el puente como un apoyo elástico, mientras que la cuerda que está en oposición de fase lo ve como un apoyo macizo. La cuerda con la frecuencia de vibración original más grave la verá incrementada y la otra cuerda disminuida, con lo que resultará que ambas acabarán vibrando exactamente a la misma frecuencia. Sin embargo, el gradiente de atenuación ya no es cero, como sucedía en el movimiento asimétrico puro, donde las cuerdas vibran a la misma frecuencia. Es decir, la desafinación genera un sonido de una sola frecuencia, que se atenúa poco a poco [14].

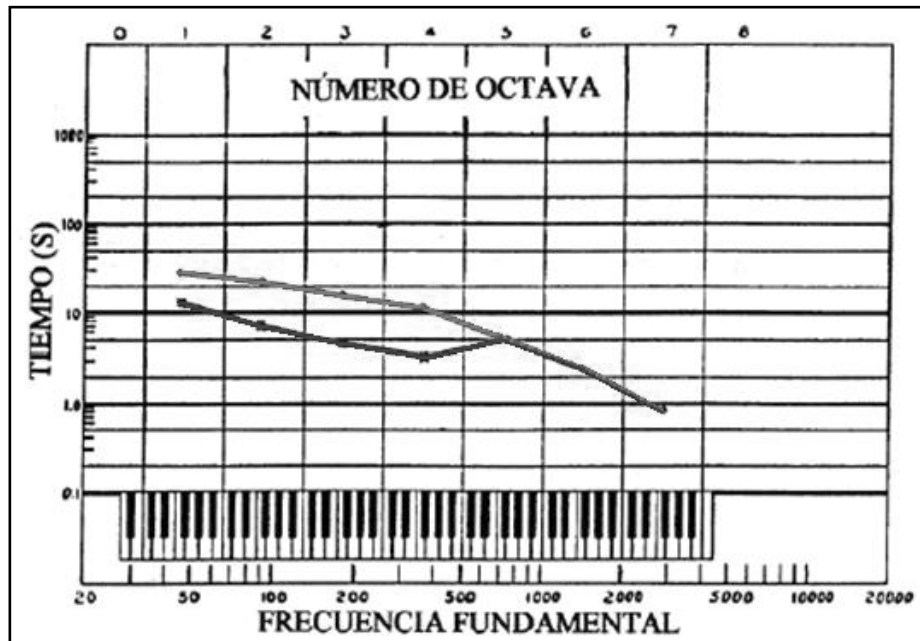


#### 4.7.4. Efecto de la doble caída a lo largo del registro

El efecto de la doble caída no se presenta de igual forma en toda la extensión del registro del piano. Es especialmente notable en la zona media del instrumento y tiende a desaparecer a medida que se asciende en el registro, teniendo las notas más agudas una sola pendiente. En el registro grave, la incoherencia entre las cuerdas múltiples tarda más tiempo en alcanzarse, lo que implica que la fase de sonido inmediato domine buena parte de la caída total del sonido y sea mucho más larga con respecto a la de notas de frecuencias superiores. En la región grave también pueden observarse oscilaciones en algunos casos, debidas, principalmente, al batido de desafinación y a la rotación del plano de polarización de la cuerda [2].

Por otro lado, mientras más aguda sea la nota, más rápida será la atenuación total de su sonido debido al mayor efecto del rozamiento del aire en altas frecuencias.

A continuación, en la **figura I.D.59**, se presenta una gráfica extraída del artículo “Decay rates of piano tones” publicado por D. W. Martin en 1947. En ella se plasma el efecto de la doble caída de las envolventes de las notas del piano a lo largo del registro del instrumento. No se indican las duraciones de cada fase de caída, sino la diferencia de pendiente entre ambas: cuanto más separadas estén las líneas, más abrupto será el cambio de pendiente entre la fase de sonido inmediato y la de resonancia. Si ambas líneas convergen en una sola significa que existe una caída simple.



**Figura I.D.59.** Gráfica del efecto de la doble caída de las envolventes a lo largo del registro del piano [4]. Línea roja: muestra el tiempo en segundos que tardaría el sonido en disminuir 60 dB si la tasa de caída fuera siempre la del sonido de resonancia. Línea azul: muestra el tiempo en segundos que tardaría el sonido en disminuir 60 dB si la tasa de caída fuera siempre la del sonido inmediato.

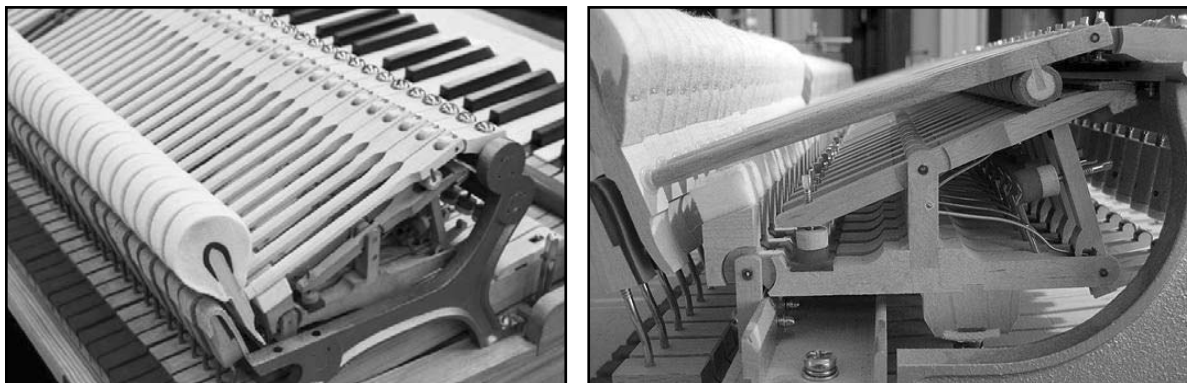
## 4.2. Mecanismo de percusión

El mecanismo de percusión del piano es un complejo sistema formado por un conjunto de palancas cuya finalidad es generar el sonido en el instrumento, relacionando la acción que realiza el intérprete al pulsar las teclas con la excitación de las cuerdas mediante el golpe de los martillos en ellas. Este sistema posee una gran precisión ya que el objetivo es controlar la percusión en la cuerda y permitir al pianista, en la medida de lo posible, modular a su gusto el sonido del instrumento.

En las siguientes **figuras I.D.60, I.D.61 y I.D.62** se muestra el mecanismo de percusión de un piano de cola desde distintos ángulos de visión.

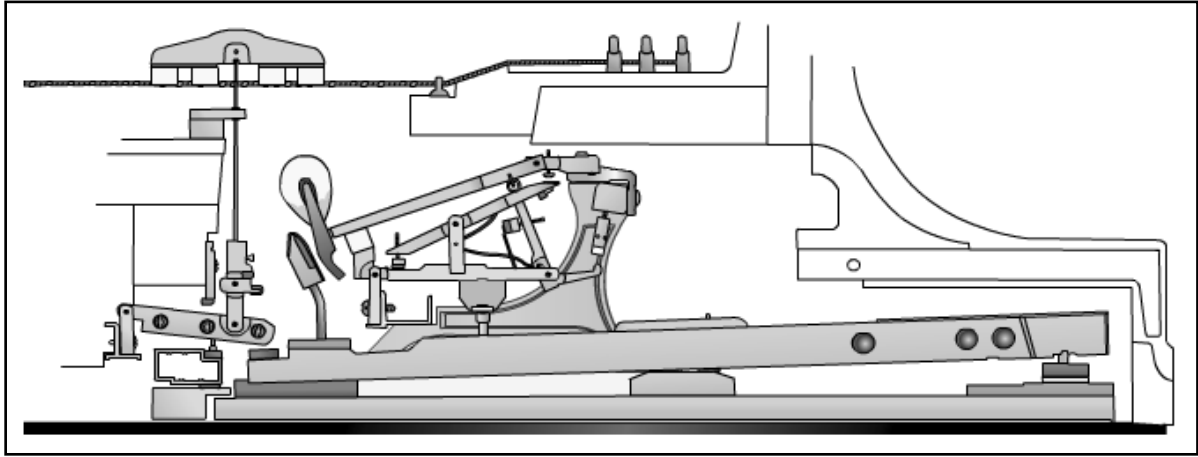


**Figuras I.D.60.** Teclado y mecanismo de percusión de un piano de cola actual [45].

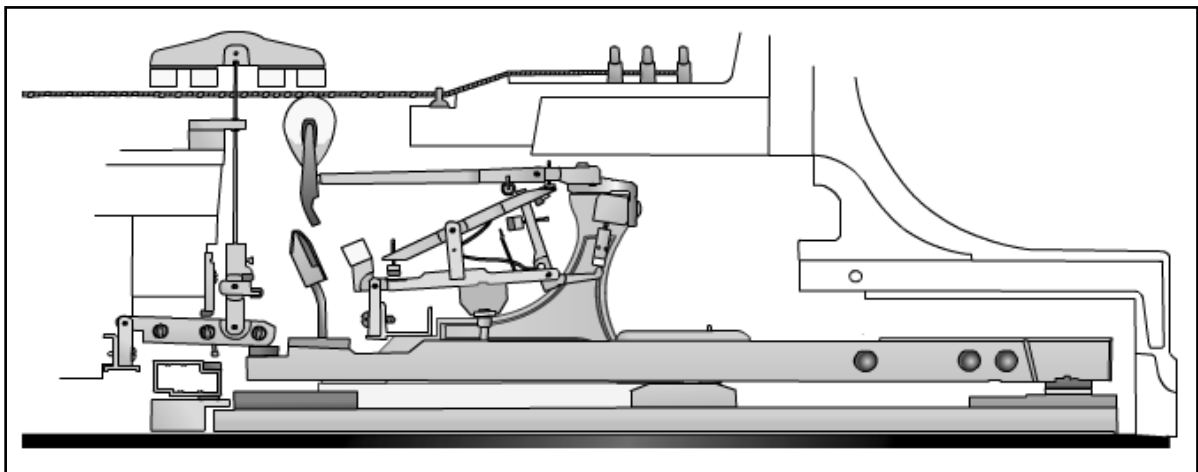


**Figuras I.D.61 y I.D.62.** Mecanismo de percusión de un piano de cola actual.

A continuación se expone un esquema del funcionamiento de dicho mecanismo contemplando dos situaciones: cuando la tecla está en posición de reposo (**figura I.D.63**) y cuando esta se acciona (**figura I.D.64**).



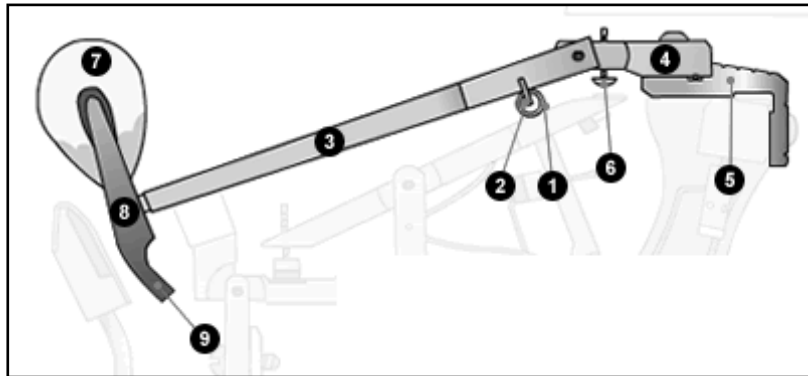
**Figura I.D.63.** Esquema del mecanismo de un piano de cola actual en reposo cuando la tecla no está accionada [48].



**Figura I.D.64.** Esquema del mecanismo de un piano de cola actual cuando se ha pulsado la tecla y el martillo está golpeando la cuerda [48].

### 4.2.1. Martillo

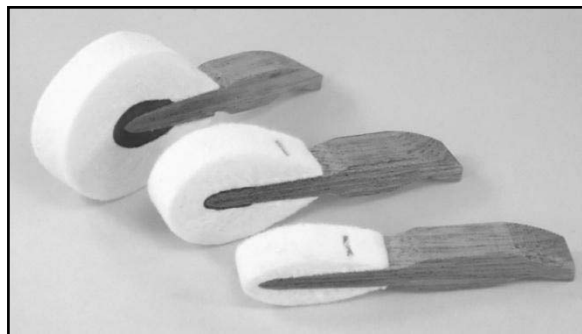
La función del martillo es percutir la cuerda para que esta se ponga en vibración y se genere el sonido. Cada martillo está formado por una cabeza situada sobre un brazo que es el encargado de recoger la fuerza ejercida por el mecanismo a través de un rodillo denominado nuez. La cabeza de los martillos tiene un núcleo de madera que, hoy en día, se recubre con lana prensada y encolada. Antiguamente se usaban pieles para forrar la estructura de madera de la cabeza.



**Figura I.D.65.** Partes del martillo de un piano de cola. (1)-(2) piezas del rodillo o nuez, (3) brazo, (4)-(5) piezas del anclaje del martillo, (6) tornillo regulador de caída, (7) fieltro de la cabeza, (8) núcleo de la cabeza y (9) talón de la cabeza [48].

#### 4.2.1.1. Interacción martillo - cuerda

Los martillos juegan un papel vital en la caracterización del timbre del piano. El ajuste de la dureza, la textura y el espesor del fieltro, así como de la masa y el tamaño de los martillos, parámetros todos ellos que varían a lo largo de la tesitura del instrumento, es vital para un correcto balance sonoro entre las diferentes notas del mismo [2]. Los martillos tienen diferentes tamaños dependiendo de la región del piano en la que van a ser colocados. Los encargados de golpear las cuerdas más graves del instrumento son los más grandes y pesados. La dimensión del fieltro de los martillos va disminuyendo conforme se avanza hacia el registro agudo (**figura I.D.66**).

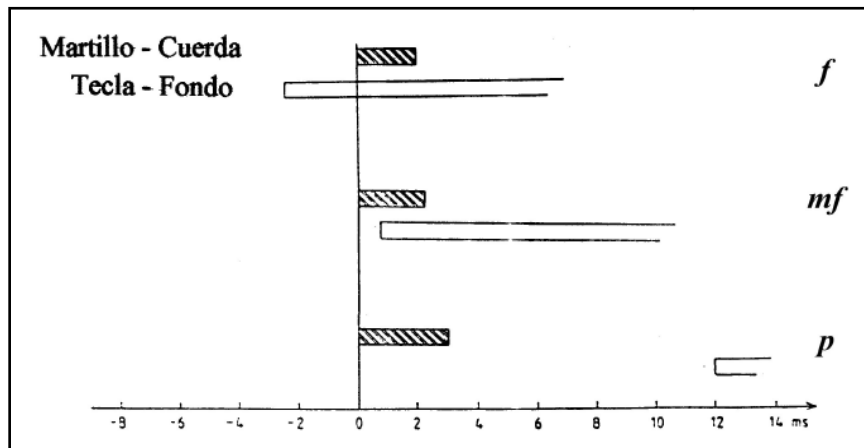


**Figura I.D.66.** Cabezas de martillos usadas para el registro grave (izq.), medio (centro) y agudo (der.).

A continuación se describirá la influencia que ejercen determinados aspectos de la interacción entre el martillo y las cuerdas sobre el sonido final del piano.

- **Tiempo de contacto del martillo con la cuerda**

El tiempo de contacto es menor cuanto mayor es la fuerza con la que se pulsa la tecla, tal y como se muestra en la siguiente **figura I.D.67**.



**Figura I.D.67.** Tiempos de contacto del martillo con la cuerda y de la tecla con el fondo del teclado para una misma nota del piano tocada con 3 diferentes fuerzas de pulsación (*forte*, *mezzoforte*, y *piano*) [9].

Generalmente el tiempo de contacto oscila alrededor de los 2 ms. A lo largo de este lapso la fuerza que ejerce el martillo sobre la cuerda no es constante, sino que viene determinada por los procesos de deformación del fieltro del martillo, así como por la reacción de la cuerda. Existe un primer período de empuje en el cual predomina la fuerza que el martillo ejerce sobre la cuerda (el fieltro se comprime), y posteriormente un período de retroceso en el cual la cuerda, que actúa como un muelle, reacciona y ejerce una fuerza sobre el martillo, que lo hará rebotar (el fieltro se expande) [2].

- **Longitud de la superficie del martillo en contacto con la cuerda**

Si la longitud de la superficie del martillo que está en contacto con la cuerda es superior a la longitud de onda de un modo particular, este se verá fuertemente atenuado. El registro agudo es el más susceptible de sufrir este efecto ya que contiene las notas de mayores frecuencias y, por tanto, de longitudes de ondas más pequeñas. Por ello, en la región superior del instrumento se emplean martillos pequeños y finos que permitan evitar atenuaciones indeseables [2].

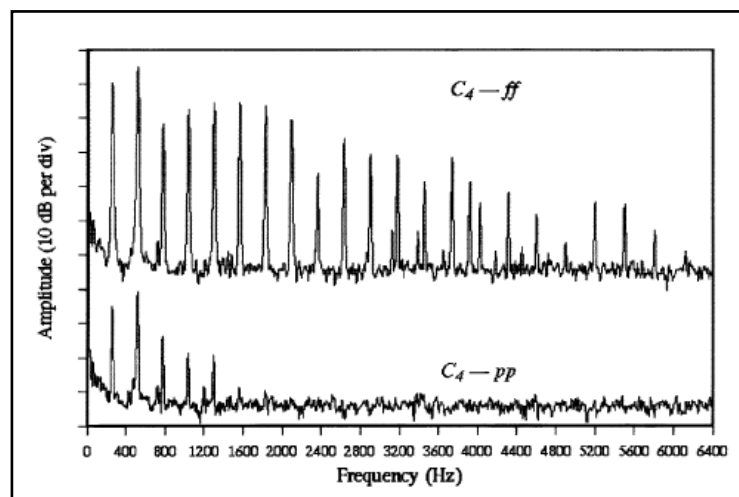
### ▪ Dureza del fieltro del martillo

El grado de dureza del fieltro del martillo es una de las características que más influye en la calidad tímbrica del sonido. Cuanto más duro es este, más firme es su compresión y más veloz es su rebote de la cuerda. De este modo, el contacto con esta será durante un breve período de tiempo, resultando amortiguada una menor cantidad de cuerda. Esto conlleva que se origine una gran cantidad de armónicos por parte de la cuerda. Los fieltros blandos, por el contrario, poseen un pelillo más profundo, susceptible de experimentar una compresión mucho menos firme, por lo que el martillo estará más tiempo en contacto con la cuerda, amortiguando en mayor medida la producción de armónicos de la cuerda.

### • Dureza del martillo según la dinámica de la interpretación

El grado de dureza que posee de fábrica cada martillo se modifica constantemente dependiendo de la fuerza con la que el pianista accione las teclas del instrumento, es decir, según la dinámica de interpretación de cada nota.

Cuanto mayor es la fuerza de pulsación de las teclas, más velocidad adquiere el martillo, siendo la compresión del fieltro del martillo es más firme y el tiempo de contacto entre este y la cuerda menor, generando así un sonido rico en armónicos. Por esta razón, las notas tocadas en *ff* (*fortissimo*) presentan un mayor número de parciales superiores que las interpretadas en *pp* (*pianissimo*) como se observa en la **figura I.D.68**.

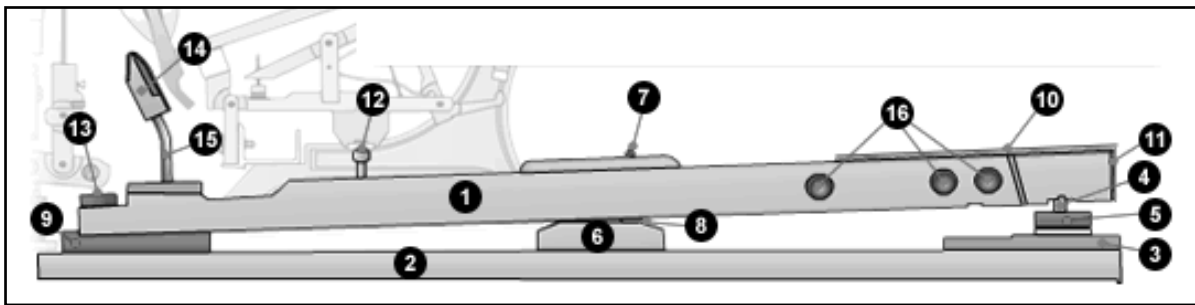


**Figura I.D.68.** Espectros frecuenciales de la nota Do4 tocada en *ff* y *pp* [2].

### 4.2.2. Tecla

Este elemento constituye la principal palanca del mecanismo de acción del instrumento. Su brazo frontal es la parte visible en donde el intérprete con sus dedos ejerce presión sobre ella. Al ser la tecla pulsada, esta pivota sobre el balancín poniendo así el mecanismo en funcionamiento a través del pilotín que se encuentra en la parte posterior de la tecla. En los pianos de cola la parte posterior de la tecla eleva el apagador y sirve para ubicar la grapa o atrape, la cual regula la caída del martillo.

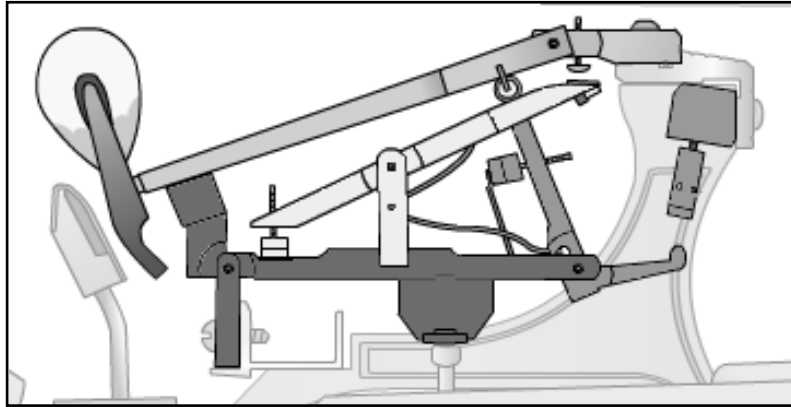
El peso de las teclas es un factor muy importante del teclado de un piano el cual está directamente relacionado con el mecanismo de percusión del martillo. Las teclas del registro grave llevan incorporadas unos cilindros de plomo con el fin de compensar el mayor peso de los martillos de la región grave e igualar el peso de todas las teclas, que suele oscilar entre los 48 y los 68 gramos [45].



**Figura I.D.69.** Partes constitutivas de la tecla y su mecanismo (piano de cola): (1) tecla, (2) tablero del teclado, (3)-(4)-(5) piezas de la guía frontal de la tecla, (6)-(7)-(8) piezas del balancín, (9) fieltro sobre el que descansa la parte posterior de la tecla, (10) zona visible donde el intérprete acciona la tecla, (11) parte frontal de la tecla, (12) pilotín, (13) fieltro en la unión entre tecla y mecanismo del apagador, (14) grapa o atrape, (15) barra de la grapa y (16) cilindros de plomos [48].

### 4.2.3. Báscula

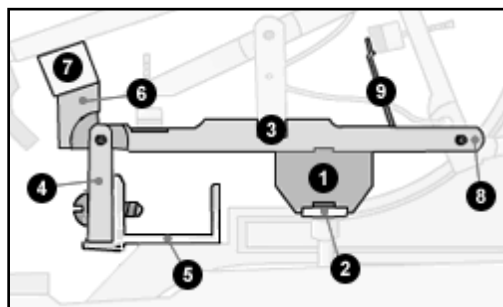
Se denomina así al conjunto de piezas que comunican la tecla con el martillo (**figura I.D. 70**). Está integrada por tres elementos: el escape, el doble escape y el mecanismo de unión de ambos con la tecla.



**Figura I.D.70.** Búsqueda de un piano de cola. Escape (*amarillo*), doble escape (*verde*) y mecanismo de unión de ambos con la tecla (*violeta*) [48].

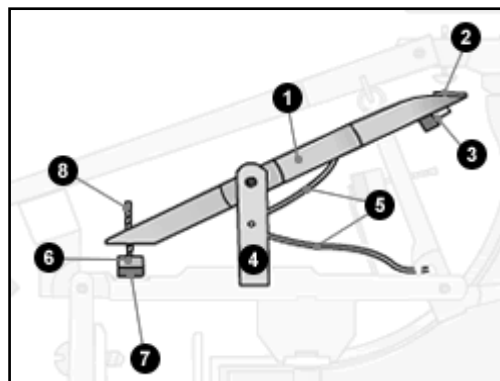
A continuación se presentan los esquemas detallados de los dispositivos anteriormente mencionados.

#### a) Mecanismo de unión del escape y doble escape con la tecla



**Figura I.D.71.** Mecanismo de unión del escape y doble escape con la tecla en un piano de cola. (1) talón, (2) cojín del talón, (3) cuerpo, (4) eje, (5) sujeción del eje, (6) pieza sobre la que descansa el martillo, (7) cojín donde descansa el martillo, (8) eje y (9) cuchara [48].

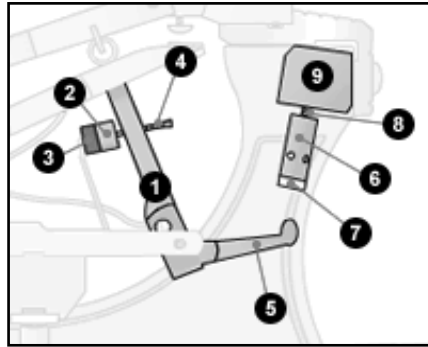
#### b) Mecanismo del escape



**Figura I.D.72.** Partes del mecanismo de repetición de un piano de cola (escape). (1) palanca de repetición, (2) superficie de cuero, (3) fieltro protector, (4) eje de la palanca de repetición, (5) muelles/resortes de repetición y (6)-(7)-(8) partes del tornillo regulador [48].



### c) Mecanismo del doble escape

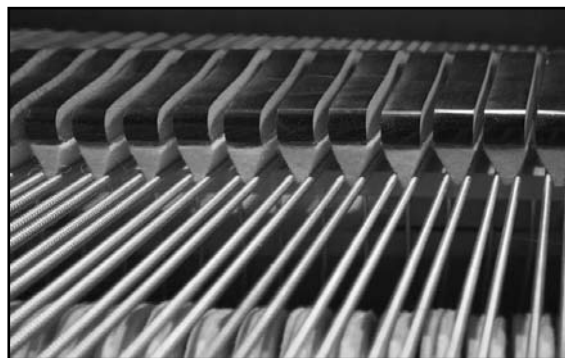


**Figura I.D.73.** Mecanismo del doble escape de un piano de cola. (1) palanca de escape, (2)-(3)-(4) partes del tornillo regulador, (5) talón de la palanca de escape, (6) pilotín de escape, (7) fieltro del pilotín de escape, (8) alambre del pilotín de escape y (9) anclaje del pilotín de escape [48].

#### 4.2.4. Apagador

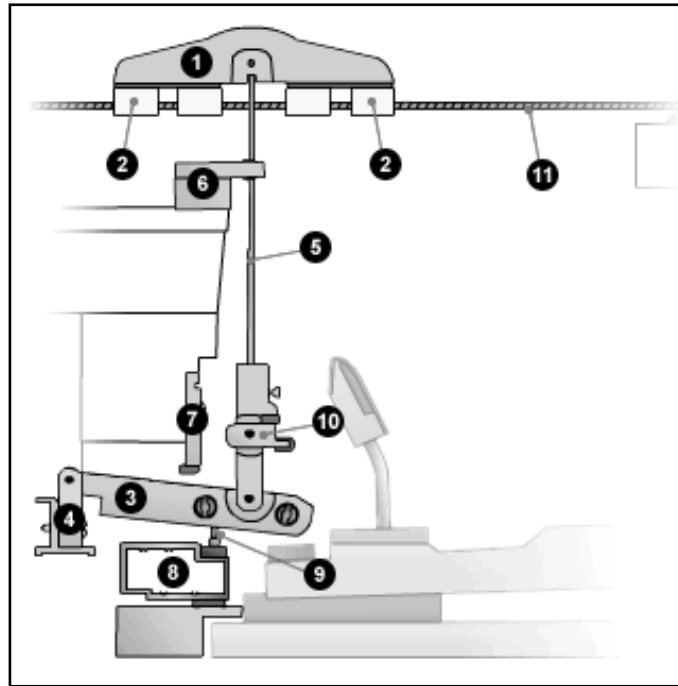
La tarea de este elemento del mecanismo es silenciar el sonido producido por las cuerdas, deteniendo su vibración al descansar sobre ellas (**figura I.D.74**). El apagador puede ser activado de tres maneras distintas:

- Cada vez que se pulsa una tecla el apagador se retira de las cuerdas elevándose antes de que el martillo las golpee. De esta manera, la cuerda podrá ponerse en vibración. Cuando la tecla deja de estar pisada el apagador vuelve a su posición inicial de reposo encima de las cuerdas.
- Mientras se mantenga pisado el pedal derecho o de resonancia todos los apagadores se quedarán elevados.
- Mediante el accionamiento del pedal central únicamente los apagadores que están levantados en ese momento (porque las teclas correspondientes están pulsadas) se mantendrán en posición suspendida mientras el pedal se encuentre presionado independientemente de si dichas teclas continúan pulsadas o no.



**Figura I.D.74.** Detalle de los apagadores descansando sobre las cuerdas.

En la siguiente figura se muestra el esquema del mecanismo de los apagadores:



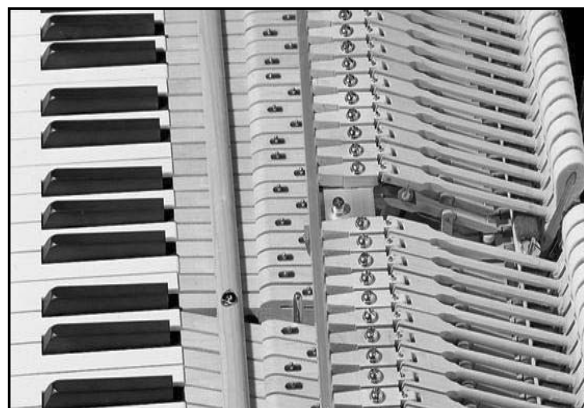
**Figura I.D.75.** Partes del mecanismo de los apagadores de un piano de cola. (1) cabeza del apagador, (2) fieltro de la cabeza del apagador, (3) palanca, (4) eje de la palanca, (5) alambre, (6) riel de guía, (7) tope de movimiento, (8) anclaje de la palanca, (9) tornillo regulador de la palanca, (10) palanca *sostenuto* y (11) cuerda [48].

### 4.3. Teclado

Se denomina teclado al conjunto de todas las teclas que contiene un piano. Representa el nexo de unión entre instrumento e intérprete.



**Figura I.D.76.** Detalle del teclado de un piano.



**Figura I.D.77.** Detalle de la unión del teclado con el mecanismo de percusión.

Prácticamente todos los pianos modernos tienen un registro de 7 octavas y una 3ª menor, desde La0 hasta Do8, contabilizando un total de 88 teclas: 36 negras y 52 blancas. El número de teclas en los teclados se ha incrementado con el tiempo, tal y como se ha mencionado en anteriores apartados.

Actualmente se construyen pianos que poseen un registro de 7 octavas (85 teclas) desde La0 hasta La7. Algunos fabricantes, por el contrario, amplían su registro hacia alguno de los dos extremos: el agudo o el grave. Por ejemplo, un piano Bösendorfer 225 tiene 92 teclas, llegando hasta el Fa0, y un Bösendorfer 290 Imperial tiene 97 teclas, abarcando un rango de 8 octavas completas.

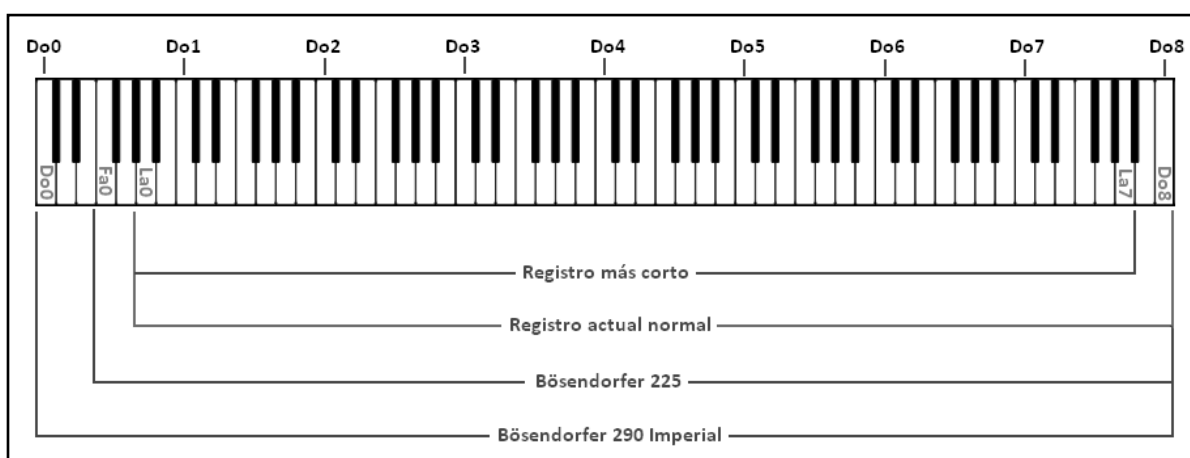


Figura I.D.78. Extensiones del registro de los pianos actuales.

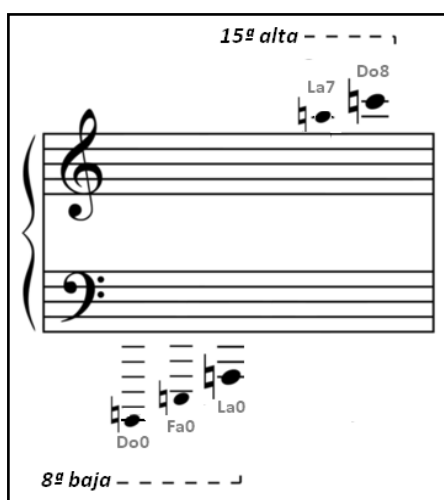


Figura I.D.79. Extensiones del registro de los pianos actuales (pentagrama).

## 4.4. Mueble del piano

El mueble del piano forma la caja de resonancia del instrumento, que amplifica y modula el sonido generado en el interior del mismo por la percusión de los martillos a las cuerdas. Este tiene una vital importancia en la configuración del timbre característico del instrumento así como el de cada piano en particular.

Además de la función de caja de resonancia, el mueble constituye la estructura que soporta y contiene a todas las piezas del piano. La caja está formada por una tapa superior móvil, una tapa inferior denominada tabla armónica y una 'faja', que es la sección de madera que une ambas tapas y rodea al instrumento proporcionándole su forma característica. En el interior del mueble se encuentra el bastidor, estructura de refuerzo formada por barrajes, y el arpa de hierro.



Figura I.D.80. Partes del mueble del piano de cola [45].

### 4.4.1. Tabla armónica

La misión del cuerpo resonante de un instrumento musical acústico es la de amplificar y radiar el sonido del mismo. En el caso del piano, es la tabla armónica la encargada de cumplir estas dos funciones. Se coloca justo debajo del arpa metálica y de las cuerdas y encima de los barrajes.

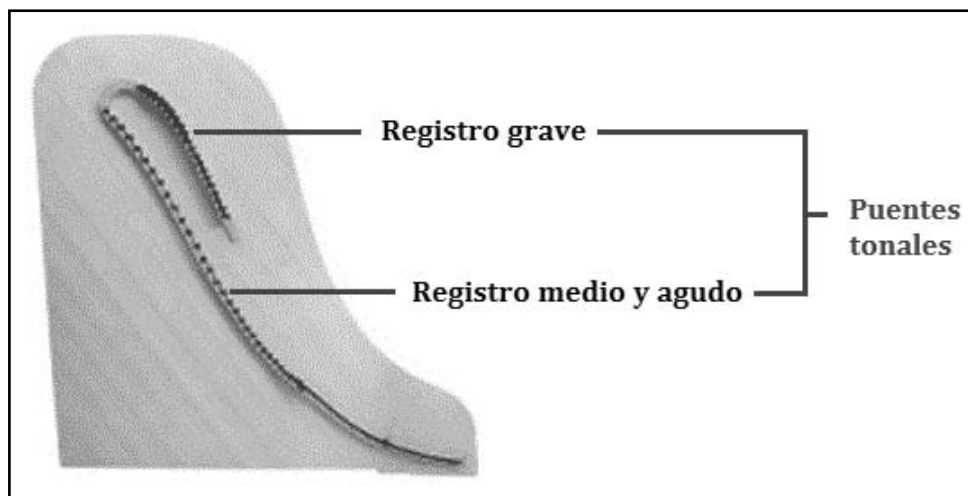
La amplia tesitura del piano requiere una tabla armónica que sea capaz de amplificar uniformemente un gran rango de frecuencias. Los avances industriales han permitido obtener tablas con respuestas en frecuencia relativamente planas [2].

La tabla armónica no es plana sino convexa en su zona central, con la finalidad de mejorar su resistencia a la presión ejercida por la cuerdas además de incrementar la resonancia del instrumento y reducir los efectos de la inarmonicidad. Posee una ligera curvatura de unos 18 metros de radio, difícilmente apreciable a primera vista.

El grosor de esta no es uniforme en toda su superficie. Dispone de un área pequeña de mayor rigidez para proyectar las frecuencias más agudas y un área de mayor extensión más delgada destinada al resto de frecuencias.

La calidad y homogeneidad de la madera con la que se construye la tabla armónica es de vital importancia. La madera utilizada suele ser de picea laminada, ya que tiene el mejor coeficiente entre resistencia mecánica, que permite soportar la enorme presión de las cuerdas, y ligereza, que favorece la captación de las vibraciones más sutiles de las cuerdas.

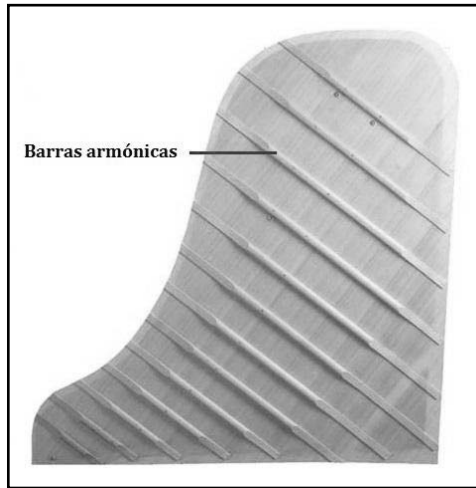
La parte superior de la tabla armónica (**figura I.D.81**) es lisa y sobre ella van encolados los dos puentes tonales. La función de estos es transmitir la vibración de las cuerdas a la tabla armónica.



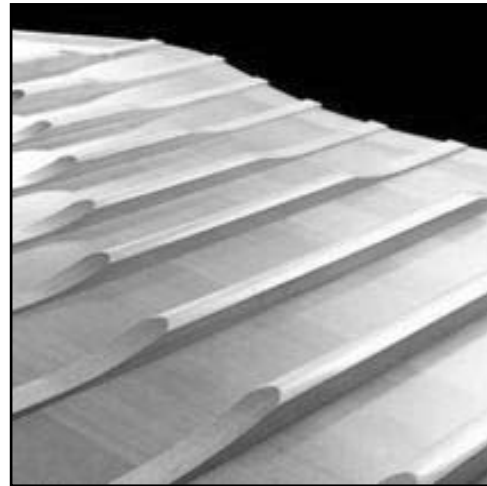
**Figura I.D.81.** parte superior de la tabla armónica de un piano de cola.

En la cara inferior de la tabla armónica (**figura I.D.82**) está atravesada, en dirección perpendicular a la veta de la madera para contribuir a repartir la resonancia en todas las direcciones, por una serie de listones denominados costillas o barras armónicas. Estas aseguran la curvatura de la tabla y la estabilidad de la tensión interior de la madera.

La cantidad de barras armónicas varía entre 8 y 14 en función de las dimensiones del instrumento. Las barras más largas se encuentran situadas en el centro de la tabla y tienen un grosor mayor, mientras que las más cortas se sitúan en los extremos y son más delgadas.



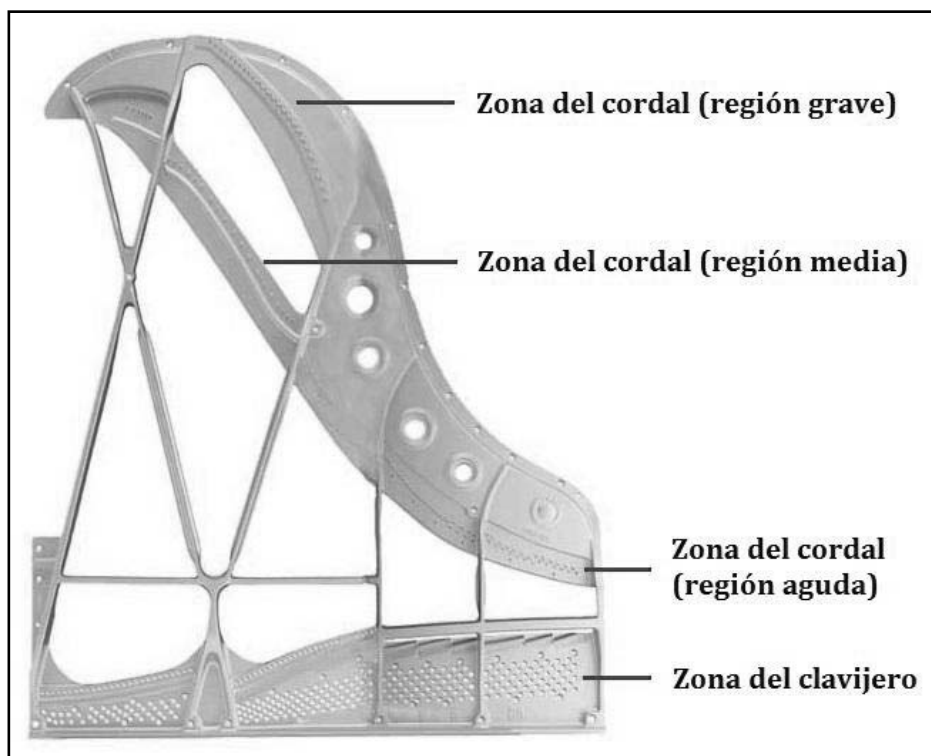
**Figura I.D.82.** Parte inferior de la tabla armónica de un piano de cola.



**Figura I.D.83.** Detalle de las barras armónicas de un piano de cola.

#### 4.4.2. Arpa metálica

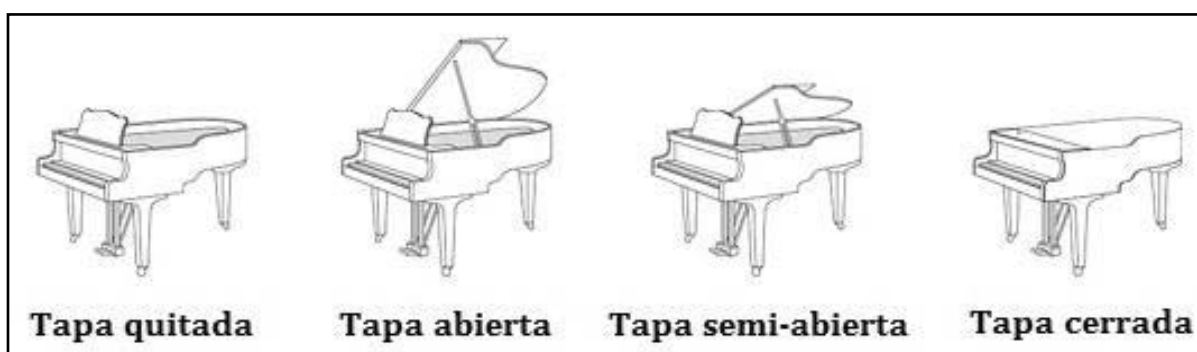
El arpa metálica es un armazón construido en una sola pieza de hierro fundido a donde se sujetan las cuerdas. Estas se fijan por un extremo a los puentes tonales en el cordal y por el otro, en el clavijero, se enrollan en las clavijas de afinación.



**Figura I.D.84.** Arpa metálica de un piano de cola.

#### 4.4.3. Tapa superior

La tapa superior de un piano de cola tiene una doble función. Por un lado, cierra el mueble protegiendo en su interior todas las partes constituyentes del instrumento, y por otro, influye en la directividad y potencia sonora del mismo. Esta parte de la mueble es móvil y se puede abrir y cerrar colocándose en distintas graduaciones de abertura (**figura I.D.85**).



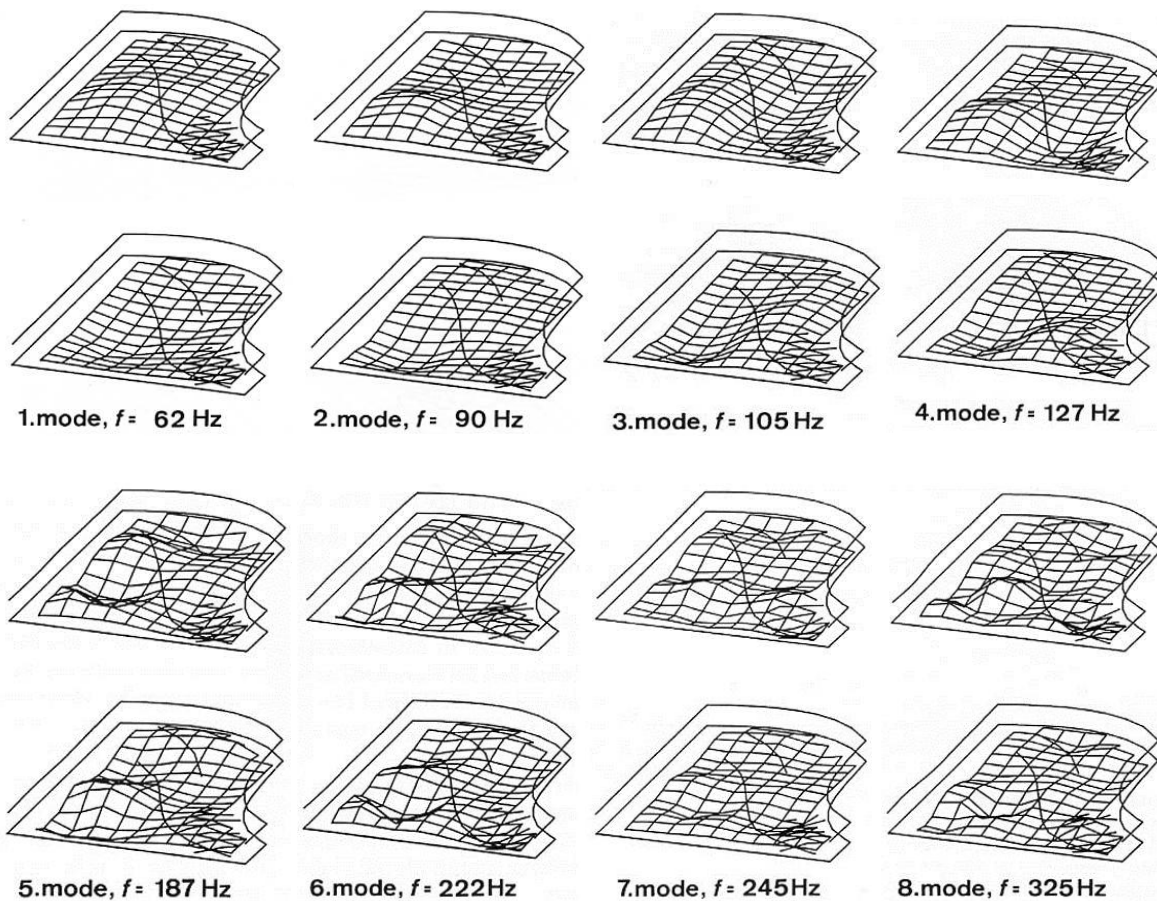
**Figura I.D.85.** Distintas posiciones de la tapa superior de un piano de cola.

En una actuación del piano como solista la tapa se suele ubicar en la posición más alta, estando lo más abierta posible. En cambio, si se toca en conjunto con otros instrumentos de menor potencia sonora se suele bajar la tapa o cerrarla por completo para conseguir un balance sonoro óptimo entre todos los instrumentos.

#### 4.4.4. Características direccionales del piano de cola

Las propiedades direccionales del piano son resultado de la interacción entre los patrones de radiación de la tabla armónica y la posición de la tapa superior del instrumento.

Sin tener en cuenta la influencia de la tapa superior, las características direccionales del piano pueden ser analizadas mediante la observación de los patrones de radiación de la tabla armónica [49]. En la siguiente figura se exponen los patrones de radiación correspondientes a los 8 primeros modos de vibración de la tabla armónica de un piano de cola de 2,9 metros de longitud [10].



**Figura I.D.86.** Patrones de radiación de 8 primeros modos de vibración de la tabla armónica de un piano de cola de 2,9 m de longitud [10].

No obstante, en la práctica es común que la tapa superior del piano esté colocada en el instrumento por lo que el ángulo de apertura que esta tenga en cada momento afecta en gran medida a las propiedades direccionales del instrumento. Dicho efecto es muy dependiente de la frecuencia de la radiación sonora emitida, incrementándose conforme los sonidos sean más agudos. Para radiaciones de muy bajas frecuencias, la tapa apenas ejerce influencia ya que las longitudes de onda de estas frecuencias son suficientemente largas para rodear la tapa [49].

En la **figura I.D.87** se muestran los modelos de radiación sonora en el plano vertical de un piano de cola con dos diferentes configuraciones: tapa abierta (ángulo de apertura de  $37,5^\circ$ ) y tapa cerrada.



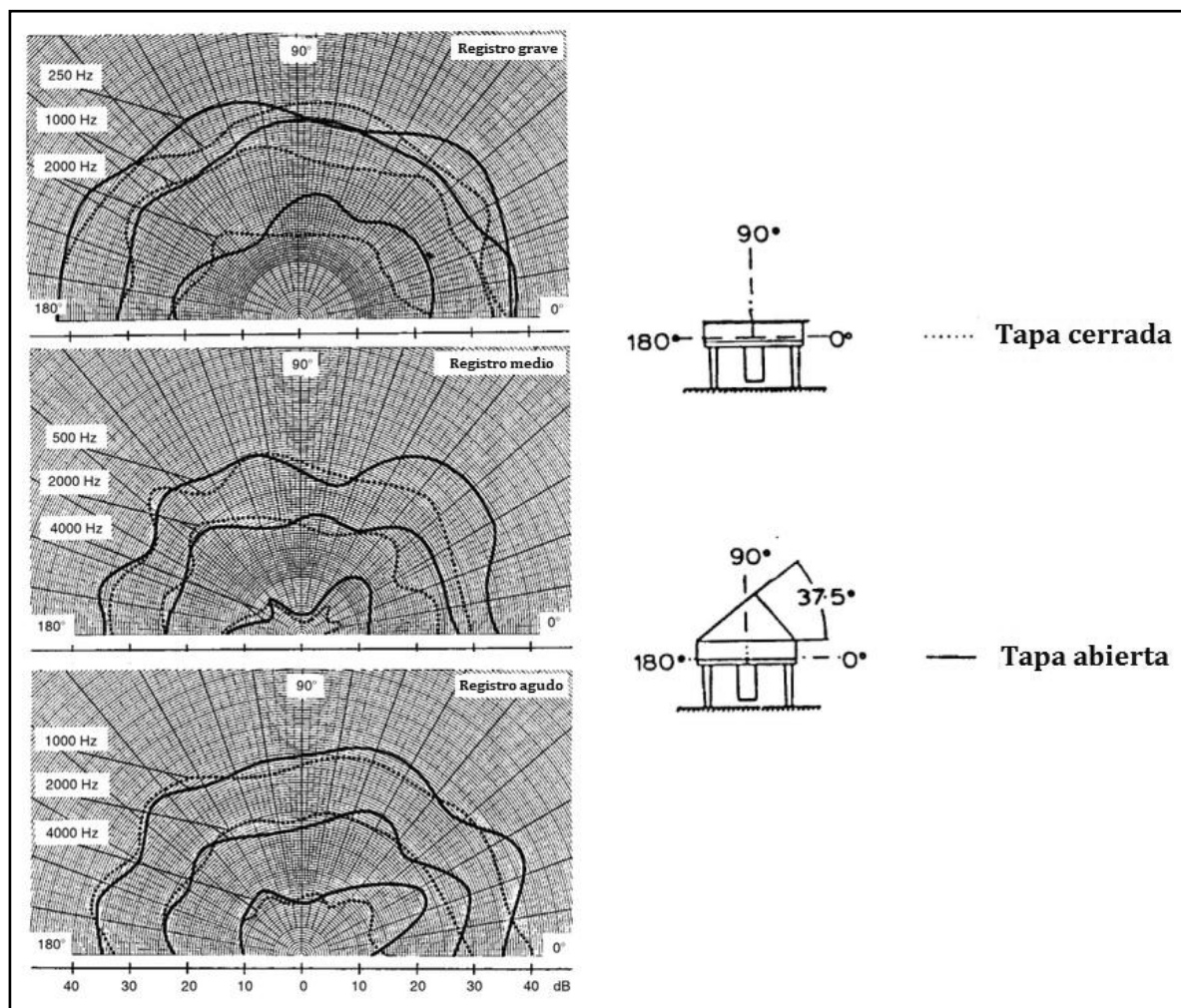


Figura I.D.87. Modelos de directividad para el plano vertical de una piano de cola [28].

Tal y como se observa en las gráficas anteriores, cuando el piano tiene la tapa cerrada presenta una distribución de energía bastante uniforme, con ligeras ondulaciones que se producen partiendo de los máximos de la tabla armónica que se reflejan en la tapa cerrada [49].

Sin embargo, cuando esta se encuentra abierta en un ángulo de  $37,5^\circ$ , existe un claro aumento de la energía sonora en la dirección de la apertura de la tapa superior del instrumento, quedando este efecto más patente conforme aumenta la frecuencia de la radiación sonora. En el registro medio (500 - 2.000 Hz) los mayores niveles de radiación se encuentran en el intervalo de  $0^\circ - 55^\circ$  y para la región aguda estos se concentran en un franja más reducida:  $15^\circ - 35^\circ$  [49].

La situación de un piano de cola en un escenario tiene en cuenta las características direccionales del mismo y por ello, siempre que sea posible, se coloca con su lado derecho hacia la audiencia de tal manera que si la tapa superior se abre esta ayude a focalizar la

radiación sonora hacia la zona donde se encuentra el público en vez de dispersar esta uniformemente en todas las direcciones.

## 4.5. Pedales

El pedal es un dispositivo mecánico, descendiente de los *hand stop* (pomos accionados con la mano) y *knee levels* (rodilleras), cuya finalidad es la modificación del sonido del instrumento.

El número de pedales a lo largo de la historia del instrumento ha variado. A mediados del s. XIX coexistían el pedal de resonancia y el pedal *una corda*, y a partir del año 1874 se empezó a incorporar también el pedal tonal. Sin embargo, en épocas anteriores los constructores, inmersos en la experimentación de las posibilidades del instrumento, lograron, mediante el uso de otros pedales registros de laúd, fagot y otros efectos más extravagantes.

Un piano moderno, tanto sea de cola o vertical, suele tener tres pedales aunque los efectos que el accionamiento de cada uno de estos producen varían según el tipo de piano. Lo usual es que los pianos de cola posean los siguientes tres pedales:

- Pedal unicordio, *una corda*, celeste o izquierdo.
- Pedal tonal, *sostenuto* o central.
- Pedal de resonancia, intensidad o derecho.

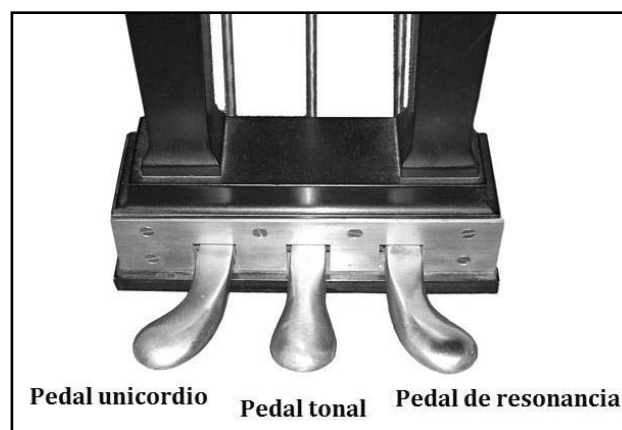


Figura I.D.88. Pedales de un piano de cola.

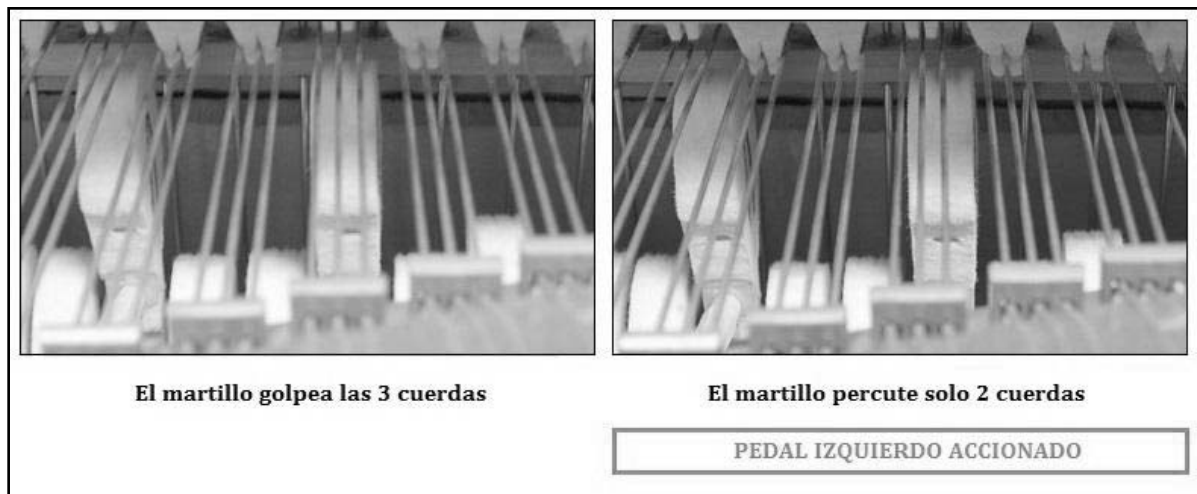
### 4.5.1. Pedal unicordio, *una corda*, celeste o izquierdo

El pedal izquierdo del piano de cola desplaza lateralmente todos los martillos para que estos percutan una cantidad de cuerdas menor de lo habitual. Como consecuencia de dicho

desplazamiento el conjunto de teclas del piano también se mueve ligeramente en la misma dirección que los martillos (generalmente hacia la izquierda).

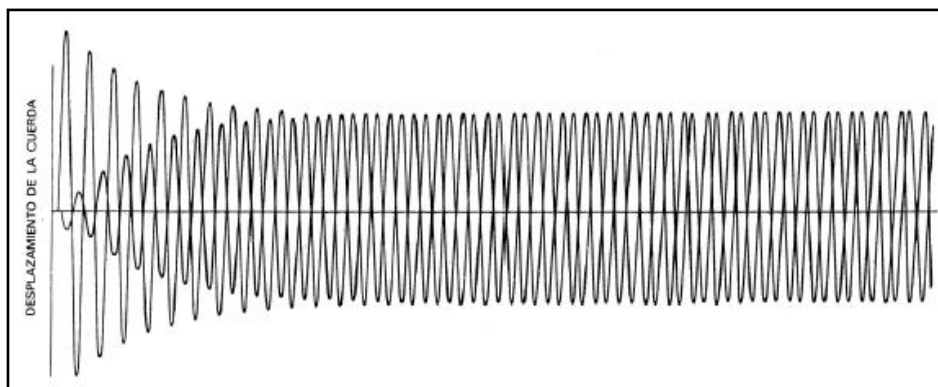
Actualmente es frecuente que el desplazamiento de las teclas y los martillos sea ajustado de tal modo que:

- Notas que poseen tres cuerdas: los martillos golpean únicamente sobre dos de ellas.
- Notas con dos cuerdas: los martillos percuten solo una.
- Notas con una cuerda: los martillos inciden en la cuerda con el borde del fieltro.



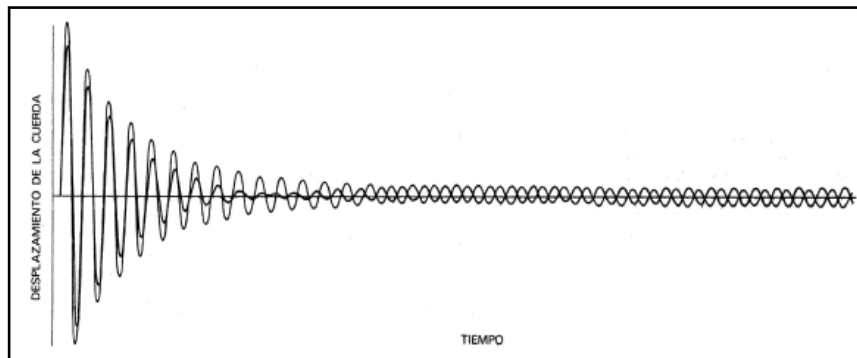
**Figura I.D.89.** Efecto del empleo del pedal izquierdo en el mecanismo del piano de cola [26].

Este pedal en un piano de cola no ejerce de una manera tan evidente el efecto de disminuir la potencia total del sonido, tal y como sí sucede en los pianos verticales. Si se supone un par de cuerdas y se percute una de ellas, la otra empezará a vibrar en oposición de fase debido a la transmisión a través del puente, tal y como muestra la **figura I.D.90**.



**Figura I.D.90.** Vibración de un par de cuerdas acopladas con el pedal *una corda* pisado [8].

En este caso, la potencia del sonido inmediato se reducirá ya que solo la cuerda percutida es la que participa en él. No obstante, el nivel sonoro de su resonancia es muy superior respecto a la percusión normal de dos cuerdas acopladas ya que la cuerda que no ha sido percutida vibra por simpatía sin ninguna influencia de la amortiguación fruto del contacto con el martillo. A continuación se presenta la vibración de dos cuerdas acopladas cuando ambas han sido percutidas.

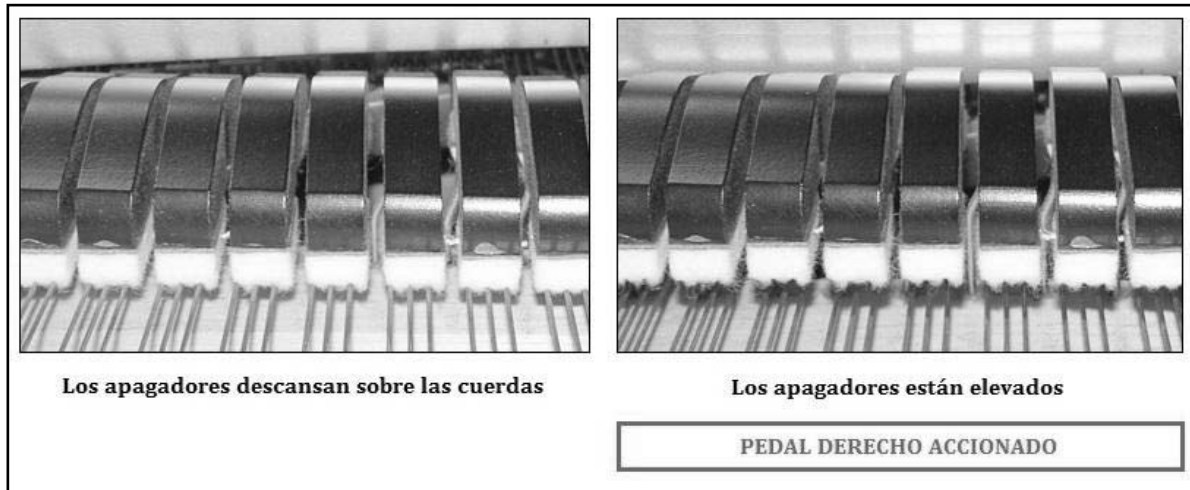


**Figura I.D.91.** Vibración de un par de cuerdas acopladas sin el accionamiento del pedal una *corda* [27].

El resultado sonoro de este pedal en los pianos de cola, se traduce, por un lado, en una reducción en el ataque y, por otro, en la transformación del timbre del instrumento debido a la diferencia de fase en la vibración de las cuerdas. El aumento de la proporción de resonancia con respecto al sonido inmediato produce un sonido más 'dulce'. Las características de este sonido hacen adecuado el uso de este pedal en pasajes musicales *cantabile*.

#### 4.5.2. Pedal de resonancia, de intensidad o derecho

La acción de este pedal eleva los apagadores de todas las cuerdas y, por lo tanto, permite la vibración libre de las mismas mientras este se mantenga pulsado. El efecto que produce su uso es doble. Por un lado, las notas que se toquen durante el tiempo que el pedal se encuentre accionado tendrán un tiempo de caída más largo debido a que al levantar las teclas la vibración de las cuerdas no será truncada por los apagadores. Por otro lado, al consentir la vibración libre de todas las cuerdas del teclado, se añaden al sonido gran cantidad de armónicos de otras cuerdas que vibran por simpatía a través del aire y del puente tonal. Esto provoca un aumento de la intensidad sonora, además de acarrear consecuencias tímbricas alterando el sonido total.

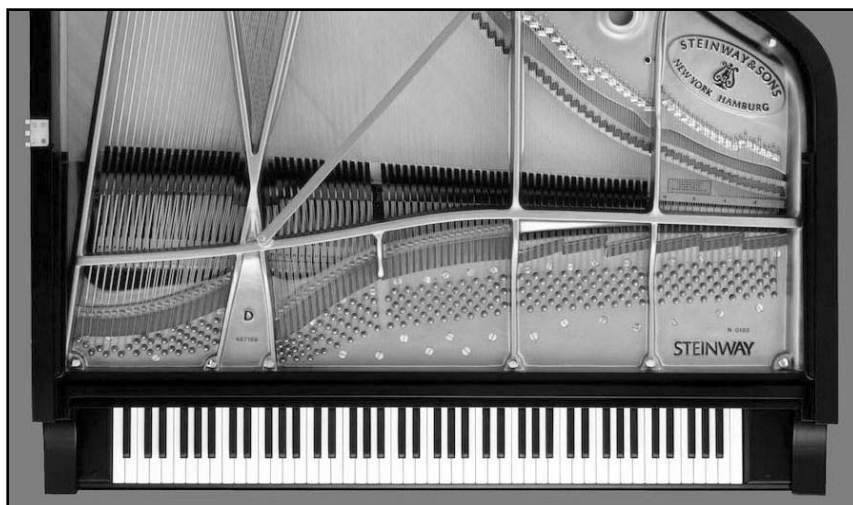


**Figura I.D.92.** Efecto del empleo del pedal derecho en el mecanismo del piano de cola [26].

El empleo de este pedal tiene, como todos, efectos interpretativos, influyendo, entre otros aspectos, sobre el fraseo, la articulación y la dinámica de la pieza musical. El pianista puede controlar su efecto de varias maneras: pisándolo a fondo o no, renovándolo con mayor o menor frecuencia, variando la velocidad de su accionamiento, etc.

Un detalle a tener en cuenta es que las notas más agudas del instrumento no poseen apagadores debido a su corto tiempo de caída. Por lo tanto, dichas cuerdas siempre están expuestas a la vibración simpática producida por las demás notas que se interpretan independientemente de que se use o no el pedal de resonancia. No obstante, el efecto de la vibración por simpatía es casi inapreciable [2].

En el caso del piano *Steinway & Sons Model D* no existen apagadores en las 17 notas más agudas del instrumento, correspondientes a las alturas comprendidas entre Sol#6 y Do8 (figura I.D.93).



**Figura I.D.93.** Detalle del interior del piano de cola Steinway & Sons Model D.

### 4.5.3. Pedal tonal, *sostenuto* o central

Este pedal es el central del piano de cola, aunque también se encuentra en algunos modelos de pianos verticales.

El efecto que produce es conocido con el nombre de *nota pedal*. Consiste en mantener en resonancia una serie de teclas mediante la desactivación de la labor de los correspondientes apagadores. Se logra pulsando las notas cuyo sonido se desea mantener y, antes de levantar las teclas, pisar el pedal. Mientras se mantenga accionado el pedal estas seguirán sonando hasta que su vibración se extinga a pesar de que las teclas ya se hayan elevado. El detalle que hace a este pedal diferenciarse del pedal de resonancia es que no afecta a las notas que se toquen después de que este haya sido pisado.

Suele ser el pedal menos utilizado del instrumento. Se usa sobre todo en la música tonal cuando se necesita mantener algunas notas sonando para poder tocar otras, pero no con la intención de entremezclar sus timbres para crear un color sonoro diferente sino simplemente mantener su resonancia, posiblemente por la imposibilidad técnica de mantener las teclas pulsadas durante mucho tiempo al tener que abordar otros pasajes musicales en un breve período de tiempo.

## Anexos II: Caracterización acústica de la sala

### II.A. Resultados de los parámetros acústicos en Dirac para MLS Interno, MLS Externo e Impulso Externo en todas las posiciones

#### POSICIÓN 1 INTERNO MLS

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,153	1,479	0,964	1,077	1,201	1,223	1,161	1,166
cc [-]:	-0,958	-0,947	-0,953	-0,991	-0,998	-0,994	-0,981	-0,967
T10 [s]:	0,331	0,668	1,309	1,217	1,267	1,239	1,093	1,008
cc [-]:	-0,946	-0,974	-0,997	-0,998	-0,999	-0,997	-0,996	-0,993
T20 [s]:	0,737	0,512	1,22	1,291	1,381	1,352	1,15	1,028
cc [-]:	-0,955	-0,989	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999
T30 [s]:	0,7	0,784	1,183	1,343	1,395	1,43	1,202	1,038
cc [-]:	-0,946	-0,99	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	18	32	41	45	43	45	44
G [dB]:	-163,82	-148,5	-135,6	-126,4	-125,4	-121	-124,7

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2099,9	229,7	46,9	61	70,9	69,6	46,7
C80 [dB]:	-5,28	1,28	8,28	5,2	4,12	3,91	6,28
D50 [-]:	0,18	0,53	0,83	0,69	0,57	0,54	0,74

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-13,01	-7,04	-5,59	0,74	-1,08	-1,53	-4,72
ST late [dB]:	-8,21	-3,26	-7,5	-1,6	-2,3	-2,02	-5,32
ST total [dB]:	-6,97	-1,75	-3,42	2,74	1,36	1,24	-2

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	23	28	26	27	26	23
EDT [s]:	1,48	0,96	1,08	1,2	1,22	1,16	1,17
D50:	0,53	0,83	0,69	0,57	0,54	0,74	0,76
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,63	(Good)
% ALC	5,6	
STI	0,63	(Good)
% ALC	5,5	
STIPA female	0,63	(Good)
% ALC	5,6	
RASTI	0,62	(Good)
% ALC	6,1	

STI male	0,62	(Good)
% ALC	5,9	

STIPA male	0,63	(Good)
% ALC	5,5	
STITEL	0,66	(Good)
% ALC	4,8	

**POSICIÓN 1****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,268	1,451	0,967	1,193	1,336	1,338	1,296	1,251
cc [-]:	-0,938	-0,973	-0,968	-0,998	-0,998	-0,986	-0,981	-0,959
T10 [s]:	0,03	0,642	1,166	1,21	1,392	1,15	1,035	0,965
cc [-]:	-0,948	-0,985	-0,998	-0,999	-0,998	-0,995	-0,993	-0,986
T20 [s]:	0,027	0,855	1,166	1,213	1,085	1,106	1,192	0,939
cc [-]:	-0,903	-0,987	-0,997	-0,999	-0,995	-0,998	-0,997	-0,995
T30 [s]:	0,027	0,803	1,161	1,33	0,997	1,044	0,899	0,849
cc [-]:	-0,903	-0,975	-0,997	-0,994	-0,991	-0,993	-0,988	-0,986

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	26	26	26	25	26	26
G [dB]:	-170,1	-155,7	-144	-135,7	-134,3	-130,1	-133,9

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2437,1	661,3	503	495,7	488,1	498,9	475,4
C80 [dB]:	-4,29	-0,41	3,81	1,54	1,35	1,09	2,28
D50 [-]:	0,17	0,43	0,66	0,48	0,45	0,48	0,56

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	10,85	-1,88	-4,96	0,77	-0,53	-2,82	-4,03
ST late [dB]:	14,17	1,63	-2,78	1,73	0,97	0,52	-0,78
ST total [dB]	13,85	3,04	-0,8	4,26	3,3	2,19	0,9

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	7	7	7	7	6
EDT [s]:	1,45	0,97	1,19	1,34	1,34	1,3	1,25
D50:	0,43	0,66	0,48	0,45	0,48	0,56	0,51
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,52	(Fair)
% ALC	10,1	
STI	0,52	(Fair)
% ALC	10	
STIPA female	0,52	(Fair)
% ALC	10	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	11	

STI male	0,52	(Fair)
% ALC	10,4	

STIPA male	0,52	(Fair)
% ALC	10,1	
STITEL	0,53	(Fair)
% ALC	9,7	



**POSICIÓN 1**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,068	1,059	1,167	1,131	1,055	0,991	0,86	0,748
cc [-]:	-0,951	-0,674	-0,989	-0,987	-0,996	-0,993	-0,992	-0,99
T10 [s]:	0,059	1,484	0,978	1,37	1,345	1,192	0,87	0,689
cc [-]:	-0,943	-0,903	-0,987	-0,998	-0,996	-0,992	-0,991	-0,999
T20 [s]:	0,033	0,748	1,049	1,305	1,358	1,417	1,132	0,911
cc [-]:	-0,916	-0,976	-0,995	-0,998	-0,999	-0,997	-0,995	-0,994
T30 [s]:	0,026	0,679	1,09	1,362	1,394	1,534	1,296	1,04
cc [-]:	-0,872	-0,99	-0,996	-0,999	-0,999	-0,998	-0,995	-0,995

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>54	38	>46	>53	>52	>55	>64
G [dB]:	-7,33	-8,57	-2,4	5,27	5,9	5,9	9,1

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	23,1	25,3	97,1	92,9	81,9	62,1	43,7
C80 [dB]:	18,91	9,41	-0,17	2,71	2,76	3,97	6,33
D50 [-]:	1	0,87	0,26	0,25	0,41	0,57	0,68

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-17,84	-10,41	3,14	10,13	5,24	1,32	-1,31
ST late [dB]:	-27,95	-10,61	2,36	6,97	3,06	-0,41	-4,59
ST total [dB]:	-17,72	-7,47	5,82	11,84	7,29	3,56	0,36

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	24	34	42	41	45	52	51
EDT [s]:	1,06	1,17	1,13	1,05	0,99	0,86	0,75
D50:	0,87	0,26	0,25	0,41	0,57	0,68	0,7
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,4	
STI	0,63	(Good)
% ALC	5,7	
STIPA female	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	
RASTI	0,6	(Good)
% ALC	6,4	

STI male	0,61	(Fair)
% ALC	6,3	

STIPA male	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	
STITEL	0,64	(Good)
% ALC	5,4	

**POSICIÓN 2****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,802	0,991	1,182	1,204	1,621	1,638	1,673	0,017
cc [-]:	-0,925	-0,966	-0,833	-0,98	-0,935	-0,932	-0,867	-0,989
T10 [s]:	0,779	0,957	1,086	1,342	1,412	1,402	1,338	1,575
cc [-]:	-0,972	-0,984	-0,991	-0,997	-0,993	-0,989	-0,986	-0,935
T20 [s]:	0,157	0,88	1,155	1,325	1,309	1,398	1,158	1,131
cc [-]:	-0,956	-0,994	-0,998	-0,999	-0,998	-0,998	-0,997	-0,992
T30 [s]:	0,154	0,887	1,184	1,306	1,272	1,351	1,185	1,046
cc [-]:	-0,954	-0,997	-0,998	-1	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	20	36	41	50	49	45	42
G [dB]:	-162,3	-145,2	-132,9	-124,4	-119,9	-116,6	-121,7

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2238,3	101,8	38,2	38,7	29,3	33,1	35,5
C80 [dB]:	-2,87	5,91	8,89	7,2	8,37	8,22	8,24
D50 [-]:	0,31	0,69	0,85	0,78	0,85	0,84	0,85

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-13,01	-7,04	-5,59	0,74	-1,08	-1,53	-4,72
ST late [dB]:	-8,21	-3,26	-7,5	-1,6	-2,3	-2,02	-5,32
ST total [dB]:	-6,97	-1,75	-3,42	2,74	1,36	1,24	-2

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	16	23	33	31	27	24	22
EDT [s]:	0,99	1,18	1,2	1,62	1,64	1,67	0,02
D50:	0,69	0,85	0,78	0,85	0,84	0,85	0,94
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,77	(Excell.)
% ALC	2,6	
STI	0,77	(Excell.)
% ALC	2,7	
STIPA female	0,78	(Excell.)
% ALC		
RASTI	0,74	(Good)
% ALC	3,2	

STI male	0,76	(Excell.)
% ALC	2,7	

STIPA male	0,78	(Excell.)
% ALC	2,5	
STITEL	0,79	(Excell.)
% ALC	2,3	

**POSICIÓN 2****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,124	1,095	1,236	1,084	1,415	1,474	1,678	1,875
cc [-]:	-0,921	-0,963	-0,945	-0,979	-0,962	-0,978	-0,946	-0,905
T10 [s]:	0,011	1,317	1,013	1,229	1,315	1,237	1,338	1,329
cc [-]:	-0,95	-0,978	-0,989	-0,993	-0,997	-0,992	-0,988	-0,971
T20 [s]:	0,04	0,777	1,025	1,445	1,341	1,207	1,08	1,18
cc [-]:	-0,974	-0,969	-0,996	-0,998	-0,999	-0,998	-0,996	-0,993
T30 [s]:	0,038	0,71	1,333	1,026	1,022	1,2	1,075	0,88
cc [-]:	-0,955	-0,964	-0,986	-0,978	-0,977	-0,999	-0,998	-0,987

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	18	25	27	25	26	26	27
G [dB]:	-168,5	-152,69	-140,96	-132,53	-129,73	-125,87	-131,7

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2014,4	500,2	411,8	455,2	432	435,7	449,2
C80 [dB]:	-2,02	3,09	5,28	4,34	4,83	3,71	3,43
D50 [-]:	0,31	0,6	0,73	0,65	0,71	0,65	0,66

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-4,94	-4,64	-8,09	-5,48	-8,5	-7,5	-8,4
ST late [dB]:	3,49	-2,38	-5,15	-3,32	-4,5	-3,46	-3,58
ST total [dB]:	2,98	-0,62	-3,34	-1,25	-3,04	-2,02	-2,34

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	7	7	8	8	7	7	6
EDT [s]:	1,09	1,24	1,08	1,42	1,47	1,68	1,88
D50:	0,6	0,73	0,65	0,71	0,65	0,66	0,64
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
STI	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
STIPA female	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
RASTI	0,6	(Good)
% ALC	6,5	

STI male	0,61	(Good)
% ALC	6,2	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,1	
STITEL	0,61	(Good)
% ALC	6,2	

<b>POSICIÓN 2</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,07	1,029	0,919	1,259	1,43	1,166	0,993	0,805
cc [-]:	-0,953	-0,67	-0,972	-0,99	-0,996	-0,994	-0,995	-0,987
T10 [s]:	0,059	1,051	1,115	1,337	1,627	1,258	0,959	0,702
cc [-]:	-0,94	-0,935	-0,995	-0,998	-0,997	-0,995	-0,995	-0,998
T20 [s]:	0,035	0,858	1,118	1,361	1,396	1,454	1,218	0,858
cc [-]:	-0,903	-0,994	-0,997	-0,999	-0,998	-0,998	-0,994	-0,996
T30 [s]:	0,02	0,841	1,172	1,338	1,383	1,54	1,345	0,922
cc [-]:	-0,921	-0,996	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,996	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	43	>44	>48	>53	>52	>56	>63
G [dB]:	-7,7	-8,42	-0,2	5,27	5,33	6,84	10,14

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	23,5	25,1	96,4	121,8	102,3	84,5	71,8
C80 [dB]:	23,78	11,09	-0,59	-3,45	-0,29	1,22	2,72
D50 [-]:	1	0,89	0,21	0,2	0,38	0,41	0,45

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-17,59	-9,72	5,45	9,25	2,13	1,96	3,71
ST late [dB]:	-25,26	-11	3,9	9,41	2,28	0,69	1,05
ST total [dB]:	-17,68	-7,5	7,78	12,33	5,23	4,38	5,59

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	31	36	42	40	45	52	55
EDT [s]:	1,03	0,92	1,26	1,43	1,17	0,99	0,8
D50:	0,89	0,21	0,2	0,38	0,41	0,45	0,69
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,56	(Fair)
% ALC	8,2	
STI	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	
STIPA female	0,55	(Fair)
% ALC	8,5	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,9	

STI male	0,56	(Fair)
% ALC	8	

STIPA male	0,55	
% ALC	8,7	
STITEL	0,6	(Good)
% ALC	6,5	

**POSICIÓN 3****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,792	1,494	1,31	1,485	1,58	1,884	1,721	0,039
cc [-]:	-0,936	-0,928	-0,871	-0,976	-0,856	-0,924	-0,847	-0,872
T10 [s]:	0,8	0,864	1,082	1,229	1,624	1,611	1,394	1,474
cc [-]:	-0,977	-0,931	-0,983	-0,993	-0,981	-0,99	-0,987	-0,977
T20 [s]:	0,678	0,811	1,182	1,295	1,305	1,402	1,258	1,122
cc [-]:	-0,978	-0,986	-0,996	-0,997	-0,996	-0,997	-0,998	-0,994
T30 [s]:	0,67	0,8	1,109	1,278	1,299	1,329	1,246	1,112
cc [-]:	-0,972	-0,992	-0,998	-0,999	-0,998	-0,998	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	20	37	43	52	53	52	49
G [dB]:	-160,9	-144,4	-132,8	-124	-119,1	-116,3	-121,5

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1975,9	96,3	36,8	41	24,3	30,6	26,8
C80 [dB]:	-4,78	5,49	8,14	6,69	9,26	7,86	8,45
D50 [-]:	0,29	0,73	0,83	0,76	0,87	0,84	0,85

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-4,23	-6,57	-9,2	-6,77	-11,34	-10,54	-10,45
ST late [dB]:	3,75	-5,74	-9,38	-6,33	-9,5	-8,3	-9
ST total [dB]:	3,71	-3,22	-6,22	-3,52	-7,32	-6,27	-6,66

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	17	24	34	35	34	31	28
EDT [s]:	1,49	1,31	1,49	1,58	1,88	1,72	0,04
D50 :	0,73	0,83	0,76	0,87	0,84	0,85	0,92
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,77	(Excell)
% ALC	2,7	
STI	0,76	(Excell)
% ALC	2,8	
STIPA female	0,77	(Excell)
% ALC	2,6	
RASTI	0,73	(Good)
% ALC	3,2	

STI male	0,76	(Excell)
% ALC	2,8	

STIPA male	0,77	(Excell)
% ALC	2,6	
STITEL	0,79	(Excell)
% ALC	2,4	

<b>POSICIÓN 3</b>
<b>EXTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,804	1,281	1,447	1,111	1,442	1,881	1,852	1,718
cc [-]:	-0,874	-0,967	-0,925	-0,961	-0,952	-0,967	-0,959	-0,958
T10 [s]:	0,11	0,934	1,009	1,262	1,309	1,409	1,38	1,131
cc [-]:	-0,828	-0,958	-0,984	-0,998	-0,994	-0,987	-0,987	-0,991
T20 [s]:	0,55	0,843	1	1,292	1,206	1,208	1,422	1,02
cc [-]:	-0,887	-0,989	-0,996	-0,999	-0,999	-0,996	-0,994	-0,996
T30 [s]:	0,546	0,657	0,955	1,258	1,254	1,248	0,966	0,966
cc [-]:	-0,885	-0,96	-0,985	-0,998	-0,997	-0,997	-0,981	-0,988

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	27	26	25	25	25	25
G [dB]:	-167,1	-153,21	-141,82	-132,91	-129,66	-126,46	-131,96

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2498,2	546,5	456,6	483,3	473,1	476,8	501,1
C80 [dB]:	-7,91	2,49	4,43	4,09	4,11	2,89	3,11
D50 [-]:	0,21	0,56	0,7	0,67	0,68	0,63	0,64

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-4,49	-4,91	-8,35	-6,89	-8,47	-9,14	-8,64
ST late [dB]:	4,54	-2,25	-4,28	-3,61	-3,89	-2,82	-2,95
ST total [dB]:	4,72	-0,33	-2,88	-1,97	-2,58	-1,91	-1,91

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	6	7	7	7	7	7	5
EDT [s]:	1,28	1,45	1,11	1,44	1,88	1,85	1,72
D50:	0,56	0,7	0,67	0,68	0,63	0,64	0,53
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	
STI	0,58	(Fair)
% ALC	7,2	
STIPA female	0,59	(Fair)
% ALC	7	
RASTI	0,6	(Fair)
% ALC	6,8	

STI male	0,59	(Fair)
% ALC	7	

STIPA male	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	
STITEL	0,59	(Fair)
% ALC	7	

**POSICIÓN 3**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,068	1,078	0,982	1,253	1,241	1,127	1,081	0,891
CC [-]:	-0,956	-0,906	-0,981	-0,992	-0,992	-0,995	-0,988	-0,991
T10 [s]:	0,062	0,982	1,059	1,171	1,294	1,223	0,917	0,831
CC [-]:	-0,938	-0,988	-0,994	-0,995	-0,998	-0,998	-0,995	-0,998
T20 [s]:	0,037	0,906	1,089	1,255	1,236	1,387	0,996	0,936
CC [-]:	-0,902	-0,995	-0,998	-0,997	-0,998	-0,999	-0,998	-0,999
T30 [s]:	0,023	0,801	1,082	1,347	1,342	1,495	1,228	1,031
CC [-]:	-0,951	-0,993	-0,998	-0,998	-0,998	-0,998	-0,995	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	44	>42	>46	>53	>53	>51	>61
G [dB]:	-6,07	-11,51	-2,52	5,42	7,32	3,79	8,47

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	23,4	36,1	103,9	113,4	84,7	76,2	61,7
C80 [dB]:	23,19	8,91	-2,21	-2,21	1,41	2,2	2,92
D50 [-]:	0,99	0,79	0,16	0,2	0,41	0,47	0,55

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-17,2	-6,58	7,98	7,67	1,36	1,43	0,36
ST late [dB]:	-27,72	-9,82	5,56	6,95	0,07	-0,49	-1,36
ST total [dB]:	-17,18	-4,86	9,87	10,35	3,77	3,59	2,6

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	29	33	42	41	40	49	53
EDT [s]:	1,08	0,98	1,25	1,24	1,13	1,08	0,89
D50 :	0,79	0,16	0,2	0,41	0,47	0,55	0,71
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,57	(Fair)
% ALC	7,6	
STI	0,6	(Good)
% ALC	6,5	
STIPA female	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	
RASTI	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	

STI male	0,57	(Fair)
% ALC	7,6	

STIPA male	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	
STITEL	0,61	(Good)
% ALC	6,2	

<b>POSICIÓN 4</b>
<b>INTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,465	1,202	1,271	1,005	1,078	1,406	1,266	1,261
cc [-]:	-0,953	-0,97	-0,964	-0,988	-0,997	-0,985	-0,967	-0,982
T10 [s]:	0,62	0,7	1,301	1,3	1,279	1,149	1,022	0,975
cc [-]:	-0,975	-0,982	-0,998	-0,996	-0,994	-0,997	-0,993	-0,995
T20 [s]:	1,382	0,894	1,175	1,324	1,367	1,275	1,103	0,988
cc [-]:	-0,967	-0,992	-0,998	-0,998	-0,999	-0,998	-0,998	-0,999
T30 [s]:	1,364	0,835	1,123	1,327	1,419	1,386	1,174	1,028
cc [-]:	-0,962	-0,993	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998	-0,998	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	18	34	41	50	48	45	45
G [dB]:	-164,6	-148,6	-135,8	-125,9	-124,5	-121,1	-125,3

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1878,8	168,6	54,4	57,7	63,1	70	55,9
C80 [dB]:	-2,92	2,31	6,81	6,08	4,35	3,49	4,38
D50 [-]:	0,37	0,51	0,78	0,65	0,59	0,58	0,66

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-12,62	-3,54	-6,4	1,12	-0,88	-2,74	-4,42
ST late [dB]:	-1,43	-1,7	-6,45	-1,47	-2,67	-1,4	-3,03
ST total [dB]:	-1,1	0,47	-3,43	3,01	1,34	0,99	-0,67

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	14	22	33	31	28	27	23
EDT [s]:	1,2	1,27	1,01	1,08	1,41	1,27	1,26
D50:	0,51	0,78	0,65	0,59	0,58	0,66	0,74
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,62	(Good)
% ALC	5,8	
STI	0,63	(Good)
% ALC	5,6	
STIPA female	0,63	(Good)
% ALC	5,7	
RASTI	0,62	(Good)
% ALC	5,9	

STI male	0,62	(Good)
% ALC	6	

STIPA male	0,63	(Good)
% ALC	5,5	
STITEL	0,67	(Good)
% ALC	4,6	



**POSICIÓN 4**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,478	1,188	1,211	1,291	1,196	1,319	1,21	1,167
CC [-]:	-0,941	-0,985	-0,933	-0,995	-0,994	-0,984	-0,96	-0,96
T10 [s]:	0,744	0,815	1,015	1,295	1,139	1,581	0,923	1,15
CC [-]:	-0,979	-0,983	-0,985	-0,995	-0,994	-0,991	-0,987	-0,997
T20 [s]:	0,638	0,792	1,002	1,357	1,218	1,23	0,975	0,96
CC [-]:	-0,946	-0,993	-0,996	-0,998	-0,999	-0,999	-0,997	-0,999
T30 [s]:	0,617	0,75	0,952	1,601	1,168	1,157	0,883	0,84
CC [-]:	-0,918	-0,982	-0,994	-0,989	-0,998	-0,997	-0,988	-0,981

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	13	27	26	25	26	26	26
G [dB]:	-170	-156,35	-144	-135,55	-134,57	-130,82	-135,19

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2468,4	581,5	497	484	509,3	500,6	509,1
C80 [dB]:	-5,26	0,17	3,23	2,27	0,81	0,72	0,99
D50 [-]:	0,13	0,41	0,64	0,54	0,44	0,44	0,49

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-3,19	-2,13	-6,31	-0,26	-0,49	-2,68	-3,38
ST late [dB]:	0,25	0,26	-2,58	0,95	1,1	1,27	0,87
ST total [dB]:	1,85	2,24	-1,04	3,39	3,39	2,74	2,26

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	6	6	7	7	7	7	6
EDT [s]:	1,19	1,21	1,29	1,2	1,32	1,21	1,17
D50:	0,41	0,64	0,54	0,44	0,44	0,49	0,37
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,5	(Fair)
% ALC	11,2	
STI	0,51	(Fair)
% ALC	10,9	
STIPA female	0,5	(Fair)
% ALC	11,6	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,6	

STI male	0,5	(Fair)
% ALC	11,3	

STIPA male	0,5	(Fair)
% ALC	11,4	
STITEL	0,51	(Fair)
% ALC	10,8	

<b>POSICIÓN 4</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,16	1,105	0,985	1,021	1,24	0,902	0,801	0,708
cc [-]:	-0,952	-0,984	-0,992	-0,993	-0,998	-0,994	-0,993	-0,986
T10 [s]:	0,457	0,679	1,22	1,303	1,381	1,257	0,861	0,757
cc [-]:	-0,937	-0,972	-0,983	-0,997	-0,999	-0,991	-0,997	-0,995
T20 [s]:	1,451	0,995	1,221	1,332	1,381	1,521	1,198	0,894
cc [-]:	-0,963	-0,981	-0,996	-0,999	-0,999	-0,997	-0,995	-0,997
T30 [s]:	7,99	0,416	1,237	1,383	1,463	1,605	1,38	1,06
cc [-]:	-0,503	-0,879	-0,998	-0,999	-0,999	-0,998	-0,995	-0,996

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>30	25	>46	>57	>57	>60	>70
G [dB]:	-25,98	-17,73	-2,46	6,5	6,54	6,17	9,31

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	207,5	77	84,1	80,1	77,9	57,4	50
C80 [dB]:	3,87	4,29	2,68	2,21	2,91	5,15	6,12
D50 [-]:	0,67	0,53	0,48	0,42	0,52	0,61	0,67

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-2,73	3,56	7,53	5,58	3,19	0,47	1,23
ST late [dB]:	-3,89	2,3	4,45	2,97	1,85	-2,83	-2,64
ST total [dB]:	-5,11	3,93	9,04	7,54	5,58	2,13	2,72

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	34	45	45	49	57	52
EDT [s]:	1,1	0,99	1,02	1,24	0,9	0,8	0,71
D50:	0,53	0,48	0,42	0,52	0,61	0,67	0,62
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,6	(Good)
% ALC	6,5	
STI	0,6	(Good)
% ALC	6,6	
STIPA female	0,61	(Good)
% ALC	6,3	
RASTI	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	

STI male	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,3	
STITEL	0,61	(Good)
% ALC	6,2	

**POSICIÓN 5****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,98	0,81	1,204	1,324	1,322	1,409	1,363	0,343
cc [-]:	-0,993	-0,976	-0,989	-0,993	-0,989	-0,998	-0,98	-0,829
T10 [s]:	0,667	1,043	1,008	1,448	1,423	1,525	1,317	0,865
cc [-]:	-0,969	-0,988	-0,996	-0,996	-0,998	-0,997	-0,998	-0,981
T20 [s]:	0,43	0,983	1,1	1,427	1,496	1,48	1,306	1,04
cc [-]:	-0,967	-0,995	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,997
T30 [s]:	0,404	0,917	1,097	1,37	1,47	1,571	1,31	1,098
cc [-]:	-0,963	-0,991	-0,999	-0,999	-1	-0,999	-1	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	31	39	49	51	49	47
G [dB]:	-164,1	-148,9	-137,4	-127,2	-123,7	-122,7	-124,9

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2038,1	243,1	70,9	57	41,4	78,5	40,9
C80 [dB]:	-4,83	1,22	5	5,15	6,94	2,55	6,48
D50 [-]:	0,21	0,21	0,67	0,68	0,77	0,53	0,77

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	0,1	5,4	-3,58	-2,97	-5,28	-1,1	-6,48
ST late [dB]:	1,9	2,1	-5,01	-4,14	-6,63	-1,56	-7,02
ST total [dB]:	2,47	7,22	-1,43	-0,5	-2,88	1,69	-3,73

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	21	32	34	32	29	29
EDT [s]:	0,81	1,2	1,32	1,32	1,41	1,36	0,34
D50:	0,21	0,67	0,68	0,77	0,53	0,77	0,93
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,67	(Good)
% ALC	4,5	
STI	0,66	(Good)
% ALC	4,7	
STIPA female	0,67	(Good)
% ALC	4,5	
RASTI	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	

STI male	0,66	(Good)
% ALC	4,7	

STIPA male	0,67	(Good)
% ALC	4,6	
STITEL	0,7	(Good)
% ALC	3,9	

<b>POSICIÓN 5</b>
<b>EXTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,532	0,763	1,033	1,24	1,365	1,575	1,517	1,298
cc [-]:	-0,985	-0,978	-0,988	-0,995	-0,991	-0,991	-0,995	-0,981
T10 [s]:	0,288	1,027	0,913	1,231	1,299	1,458	1,313	1,297
cc [-]:	-0,898	-0,993	-0,987	-0,994	-0,999	-0,996	-1	-0,999
T20 [s]:	0,255	0,674	0,963	1,202	1,617	1,527	1,033	1,014
cc [-]:	-0,935	-0,983	-0,994	-0,998	-0,993	-0,995	-0,99	-0,996
T30 [s]:	0,21	1,661	0,717	1,399	0,899	1,074	0,904	0,902
cc [-]:	-0,865	-0,961	-0,984	-0,99	-0,971	-0,985	-0,975	-0,968

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	14	24	25	25	25	24	24
G [dB]:	-170,5	-156,69	-145,99	-136,25	-132,43	-130,5	-134,86

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2452,8	762,9	595,1	558,2	514	535,9	553,2
C80 [dB]:	-6,76	0,11	1,88	1,73	3,24	1,79	2,3
D50 [-]:	0,15	0,13	0,5	0,5	0,63	0,56	0,57

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	10,37	9,07	-1,92	-1,42	-5,42	-3,54	-4,53
ST late [dB]:	16,79	7,8	0,03	0,29	-2,61	-0,67	-1,45
ST total [dB]:	16,85	11,5	2,1	2,52	-0,77	1,14	0,28

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	4	5	6	6	6	6	5
EDT [s]:	0,76	1,03	1,24	1,36	1,57	1,52	1,3
D50:	0,13	0,5	0,5	0,63	0,56	0,57	0,63
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,54	(Fair)
% ALC	9,1	
STI	0,53	(Fair)
% ALC	9,5	
STIPA female	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	
RASTI	0,52	(Fair)
% ALC	10,3	

STI male	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	

STIPA male	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	
STITEL	0,54	(Fair)
% ALC	9,4	

**POSICIÓN 5**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,069	0,047	0,964	1,145	1,249	1,3	1,028	0,9
cc [-]:	-0,952	-0,975	-0,945	-0,988	-0,995	-0,994	-0,991	-0,991
T10 [s]:	0,059	1,028	1,233	1,524	1,417	1,386	1,115	0,78
cc [-]:	-0,94	-0,943	-0,968	-0,997	-0,997	-0,996	-0,992	-0,996
T20 [s]:	0,036	0,879	1,337	1,404	1,34	1,617	1,42	0,976
cc [-]:	-0,896	-0,986	-0,995	-0,998	-0,998	-0,998	-0,995	-0,995
T30 [s]:	0,022	0,792	1,319	1,376	1,447	1,679	1,532	1,093
cc [-]:	-0,892	-0,991	-0,996	-0,999	-0,998	-0,999	-0,997	-0,996

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	44	37	>44	>53	>53	>55	>61
G [dB]:	-7,69	-9,22	-4,54	3,08	3,56	3,71	5,49

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	23,4	20,1	95,4	112,7	103,4	82,5	61,4
C80 [dB]:	20,75	12,41	-0,68	-1,41	-0,55	1,74	3,8
D50 [-]:	1	0,93	0,25	0,13	0,31	0,49	0,56

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-18,12	-11,23	2,35	9,94	4,76	-0,39	-0,58
ST late [dB]:	-26,6	-14,17	2,75	9,36	4,45	0,52	-1,33
ST total [dB]:	-18	-9,6	5,69	12,67	7,64	3,05	2,07

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	23	32	42	41	45	50	47
EDT [s]:	0,05	0,96	1,15	1,25	1,3	1,03	0,9
D50:	0,93	0,25	0,13	0,31	0,49	0,56	0,59
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,56	(Fair)
% ALC	8,1	
STI	0,6	(Good)
% ALC	6,5	
STIPA female	0,54	(Fair)
% ALC	9	
RASTI	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	

STI male	0,57	(Fair)
% ALC	7,8	

STIPA male	0,54	(Fair)
% ALC	9,1	
STITEL	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	

<b>POSICIÓN 6</b>
<b>INTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,771	0,915	1,392	1,204	1,2	1,431	1,28	0,526
cc [-]:	-0,987	-0,986	-0,988	-0,992	-0,935	-0,97	-0,971	-0,672
T10 [s]:	0,589	0,858	1,142	1,193	1,308	1,381	1,256	1,158
cc [-]:	-0,978	-0,986	-0,997	-0,998	-0,996	-0,995	-0,995	-0,993
T20 [s]:	0,471	0,871	1,072	1,294	1,3	1,335	1,139	0,998
cc [-]:	-0,984	-0,995	-0,997	-0,998	-0,998	-0,999	-0,998	-0,996
T30 [s]:	0,463	0,921	1,055	1,322	1,399	1,412	1,184	0,996
cc [-]:	-0,982	-0,991	-0,998	-0,999	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	23	34	37	50	50	48	45
G [dB]:	-164,2	-148,6	-136,5	-125	-120	-116,3	-122

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1239,7	166,2	93,3	46,4	25,4	33,6	36,3
C80 [dB]:	0,18	3,51	5,11	6,26	9,28	7,84	7,59
D50 [-]:	0,47	0,44	0,69	0,73	0,86	0,82	0,79

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-4,07	4	-5,41	-3,82	-8,21	-7,38	-7,02
ST late [dB]:	0,48	0,33	-5,52	-5,49	-9,84	-8,04	-7,93
ST total [dB]:	1,62	5,55	-2,48	-1,57	-5,95	-4,68	-4,45

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	14	18	33	33	30	27	25
EDT [s]:	0,91	1,39	1,2	1,2	1,43	1,28	0,53
D50:	0,44	0,69	0,73	0,86	0,82	0,79	0,92
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,74	(Good)
% ALC	3,2	
STI	0,72	(Good)
% ALC	3,5	
STIPA female	0,75	(Good)
% ALC	3	
RASTI	0,71	(Good)
% ALC	3,7	

STI male	0,73	(Good)
% ALC	3,3	

STIPA male	0,75	(Good)
% ALC	3	
STITEL	0,75	(Excell)
% ALC	2,9	

**POSICIÓN 6**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,667	1,084	1,211	1,195	1,569	1,227	1,461	1,42
cc [-]:	-0,991	-0,982	-0,977	-0,994	-0,957	-0,918	-0,983	-0,95
T10 [s]:	0,607	0,898	1,027	1,125	1,335	1,562	1,293	1,317
cc [-]:	-0,986	-0,976	-0,995	-0,992	-0,996	-0,993	-0,996	-0,99
T20 [s]:	0,573	0,734	0,955	1,455	0,947	1,241	1,004	1,009
cc [-]:	-0,963	-0,992	-0,997	-0,993	-0,99	-0,994	-0,994	-0,993
T30 [s]:	0,54	0,683	0,919	0,817	0,867	1,079	0,884	0,956
cc [-]:	-0,93	-0,987	-0,995	-0,986	-0,971	-0,992	-0,976	-0,993

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	19	26	26	24	24	25	24
G [dB]:	-170,8	-156,8	-145,74	-133,71	-128,14	-124,23	-131,94

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1820,8	699,5	540	540,7	509,2	497,8	563,1
C80 [dB]:	-1,63	1,11	2,49	2,66	4,35	4,48	2,47
D50 [-]:	0,4	0,4	0,56	0,57	0,7	0,72	0,59

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	2,49	4,1	-5,49	-3,16	-7,88	-9,21	-6,03
ST late [dB]:	5,6	3,59	-1,55	-1,28	-3,86	-4,16	-2,28
ST total [dB]:	4,72	6,62	-0,24	0,9	-2,41	-2,98	-0,75

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	4	5	6	6	6	5	4
EDT [s]:	1,08	1,21	1,2	1,57	1,23	1,46	1,42
D50:	0,4	0,56	0,57	0,7	0,72	0,59	0,59
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	
STI	0,56	(Fair)
% ALC	8,1	
STIPA female	0,59	(Fair)
% ALC	7	
RASTI	0,59	(Fair)
% ALC	7	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	

STIPA male	0,59	(Fair)
% ALC	7	
STITEL	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

<b>POSICIÓN 6</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,432	1,438	1,358	1,275	1,281	1,26	1,238	0,96
cc [-]:	-0,744	-0,99	-0,99	-0,991	-0,996	-0,997	-0,995	-0,974
T10 [s]:	1,184	0,88	0,898	1,292	1,408	1,617	1,099	0,93
cc [-]:	-0,96	-0,984	-0,996	-0,996	-0,998	-0,997	-0,997	-0,996
T20 [s]:	0,038	0,793	1,036	1,264	1,421	1,652	1,298	0,904
cc [-]:	-0,801	-0,993	-0,996	-0,999	-0,999	-0,999	-0,997	-0,998
T30 [s]:	0,037	0,789	1,002	1,324	1,48	1,691	1,426	0,987
cc [-]:	-0,79	-0,991	-0,998	-0,999	-0,999	-1	-0,997	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>29	>33	>41	>49	>48	>49	>55
G [dB]:	-28,27	-22,17	-7,87	0,66	0,76	3,06	1,55

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	340,7	142,1	126,7	124,9	101,4	91,1	65,4
C80 [dB]:	3,26	0,09	-3,04	-3,6	0,09	1,62	3,51
D50 [-]:	0,64	0,32	0,14	0,13	0,32	0,45	0,59

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-3,3	3,73	9,76	11,1	4,76	3,88	-0,8
ST late [dB]:	-3,1	3,74	8,91	10,62	3,74	2,21	-1,76
ST total [dB]:	-3,34	5,87	12,28	13,9	7,29	6,14	1,76

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	19	29	38	37	39	43	49
EDT [s]:	1,44	1,36	1,27	1,28	1,26	1,24	0,96
D50:	0,32	0,14	0,13	0,32	0,45	0,59	0,83
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,57	(Fair)
% ALC	7,9	
STI	0,56	(Fair)
% ALC	8,2	
STIPA female	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	
RASTI	0,53	(Fair)
% ALC	9,6	

STI male	0,56	(Fair)
% ALC	8,4	

STIPA male	0,53	(Fair)
% ALC	9,4	
STITEL	0,54	(Fair)
% ALC	8,9	



**POSICIÓN 7****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,961	0,921	1,402	1,406	1,071	1,493	1,448	0,993
cc [-]:	-0,989	-0,994	-0,976	-0,99	-0,966	-0,975	-0,972	-0,812
T10 [s]:	0,735	0,78	1,038	1,361	1,252	1,433	1,323	1,273
cc [-]:	-0,96	-0,993	-0,997	-0,995	-0,997	-0,991	-0,986	-0,997
T20 [s]:	0,52	0,824	1,02	1,306	1,313	1,298	1,139	0,994
cc [-]:	-0,953	-0,998	-0,998	-0,998	-0,999	-0,998	-0,996	-0,995
T30 [s]:	0,514	0,886	1,096	1,315	1,332	1,34	1,151	0,992
cc [-]:	-0,95	-0,995	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	16	32	42	49	47	44	43
G [dB]:	-162,5	-148,9	-136,5	-125,2	-119,8	-116,2	-121,8

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1973,1	226,3	61,9	49	29,2	38,9	42,2
C80 [dB]:	-4,58	2,84	4,41	5,62	9,2	7,44	6,89
D50 [-]:	0,27	0,45	0,67	0,74	0,84	0,81	0,78

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	2,42	3,24	-5,58	-4,2	-7,11	-7,06	-7,49
ST late [dB]:	3,4	0,65	-4,87	-5,09	-9,17	-7,73	-7,54
ST total [dB]:	4,36	4,84	-2,29	-1,61	-5,01	-4,37	-4,5

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	23	31	30	27	24	23
EDT [s]:	0,92	1,4	1,41	1,07	1,49	1,45	0,99
D50:	0,45	0,67	0,74	0,84	0,81	0,78	0,89
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,72	(Good)
% ALC	3,5	
STI	0,69	(Good)
% ALC	4	
STIPA female	0,72	(Good)
% ALC	3,4	
RASTI	0,7	(Good)
% ALC	3,9	

STI male	0,71	(Good)
% ALC	3,6	

STIPA male	0,73	(Good)
% ALC	3,3	
STITEL	0,74	(Good)
% ALC	3,1	

<b>POSICIÓN 7</b>
<b>EXTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,422	0,84	1,533	1,526	1,322	1,347	1,59	1,61
CC [-]:	-0,99	-0,989	-0,985	-0,994	-0,969	-0,958	-0,983	-0,908
T10 [s]:	0,348	0,757	0,938	1,402	1,31	1,377	1,296	1,181
CC [-]:	-0,963	-0,979	-0,981	-0,993	-0,999	-0,993	-0,984	-0,989
T20 [s]:	0,246	0,883	0,903	0,992	1,177	1,308	1,203	0,945
CC [-]:	-0,949	-0,977	-0,99	-0,994	-0,997	-0,997	-0,997	-0,983
T30 [s]:	0,234	0,82	0,894	0,92	0,998	1,174	0,914	0,847
CC [-]:	-0,943	-0,982	-0,991	-0,992	-0,987	-0,997	-0,981	-0,98

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	17	26	27	27	26	26	26
G [dB]:	-168,8	-156,71	-145,76	-133,05	-127,69	-123,02	-130,17

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2180,5	680,7	462,9	459,4	430,4	422,3	473,7
C80 [dB]:	-4,36	1,24	2,24	2,77	4,93	4,91	3,46
D50 [-]:	0,36	0,43	0,57	0,58	0,71	0,73	0,65

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	3,07	3,51	-4,73	-4,07	-7,69	-8,34	-7,23
ST late [dB]:	5,32	2,45	-1,6	-1,71	-4,55	-4,65	-3,26
ST total [dB]:	6,29	5,9	0,03	0,28	-2,82	-3,1	-1,79

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	7	8	8	7	5
EDT [s]:	0,84	1,53	1,53	1,32	1,35	1,59	1,61
D50 :	0,43	0,57	0,58	0,71	0,73	0,65	0,66
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,6	(Good)
% ALC	6,5	
STI	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	
STIPA female	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
RASTI	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	

STI male	0,6	(Fair)
% ALC	6,6	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,3	
STITEL	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	

**POSICIÓN 7**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,087	1,425	1,04	1,362	1,456	1,378	1,194	1,061
cc [-]:	-0,984	-0,987	-0,971	-0,995	-0,995	-0,992	-0,995	-0,992
T10 [s]:	0,679	0,667	1,199	1,39	1,498	1,305	1,153	0,835
cc [-]:	-0,959	-0,966	-0,975	-0,995	-0,999	-0,997	-0,998	-0,997
T20 [s]:	0,043	0,816	1,135	1,349	1,444	1,586	1,305	1,018
cc [-]:	-0,977	-0,988	-0,993	-0,999	-0,999	-0,997	-0,998	-0,996
T30 [s]:	0,036	0,814	1,144	1,361	1,432	1,648	1,456	1,138
cc [-]:	-0,94	-0,989	-0,997	-1	-1	-0,999	-0,997	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	24	>36	>47	>54	>51	>52	>61
G [dB]:	-26,96	-18,37	-2,5	5,12	4,96	4,7	8,59

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	277	119,9	112,6	118	118,6	104,3	80,2
C80 [dB]:	3,49	0,06	-1,86	-0,8	-1,47	0,11	2,1
D50 [-]:	0,61	0,3	0,13	0,27	0,26	0,37	0,47

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	277	119,9	112,6	118	118,6	104,3	80,2
C80 [dB]:	3,49	0,06	-1,86	-0,8	-1,47	0,11	2,1
D50 [-]:	0,61	0,3	0,13	0,27	0,26	0,37	0,47

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	22	35	43	40	42	49	50
EDT [s]:	1,42	1,04	1,36	1,46	1,38	1,19	1,06
D50:	0,3	0,13	0,27	0,26	0,37	0,47	0,55
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,51	(Fair)
% ALC	10,7	
STI	0,51	(Fair)
% ALC	10,5	
STIPA female	0,5	(Fair)
% ALC	11,6	
RASTI	0,49	(Fair)
% ALC	12,3	

STI male	0,5	(Fair)
% ALC	11,1	

STIPA male	0,5	(Fair)
% ALC	11,5	
STITEL	0,51	(Fair)
% ALC	10,6	

<b>POSICIÓN 8</b>
<b>INTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,873	0,612	1,143	1,447	1,199	1,519	1,278	0,522
cc [-]:	-0,99	-0,958	-0,992	-0,997	-0,993	-0,997	-0,997	-0,916
T10 [s]:	0,95	1,128	0,998	1,225	1,086	1,421	1,243	0,946
cc [-]:	-0,93	-0,987	-0,994	-0,996	-0,999	-0,998	-1	-0,987
T20 [s]:	0,842	0,997	1,124	1,357	1,325	1,397	1,235	1,024
cc [-]:	-0,951	-0,995	-0,997	-0,998	-0,995	-1	-1	-0,998
T30 [s]:	0,84	0,842	1,131	1,351	1,376	1,497	1,264	1,065
cc [-]:	-0,949	-0,99	-0,999	-0,999	-0,998	-0,999	-1	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>13	31	39	48	50	46	44
G [dB]:	-163,4	-149,4	-137,7	-127,6	-123,2	-122,4	-127

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1885,5	238,4	77,3	67,4	47	77,6	67,1
C80 [dB]:	-2,49	4,43	4,72	3,61	5,38	2,64	3,82
D50 [-]:	0,24	0,18	0,59	0,62	0,72	0,56	0,62

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,34	6,78	-2,07	-2,25	-4,13	-1,59	-1,87
ST late [dB]:	2,5	0,5	-4,46	-2,58	-5,44	-1,71	-2,6
ST total [dB]:	4,33	7,71	-0,12	0,6	-1,73	1,36	0,78

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	20	31	32	29	26	25
EDT [s]:	0,61	1,14	1,45	1,2	1,52	1,28	0,52
D50:	0,18	0,59	0,62	0,72	0,56	0,62	0,9
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,64	(Good)
% ALC	5,4	
STI	0,64	(Good)
% ALC	5,3	
STIPA female	0,63	(Good)
% ALC	5,5	
RASTI	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STI male	0,64	(Good)
% ALC	5,5	

STIPA male	0,64	(Good)
% ALC	5,4	
STITEL	0,67	(Good)
% ALC	4,4	

**POSICIÓN 8**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,713	0,589	1,102	1,226	1,386	1,365	1,271	1,126
cc [-]:	-0,993	-0,961	-0,993	-0,998	-0,994	-0,994	-0,998	-0,994
T10 [s]:	0,72	0,775	0,931	1,124	1,246	1,194	1,26	1,013
cc [-]:	-0,987	-0,984	-0,994	-0,996	-0,997	-0,999	-0,999	-0,999
T20 [s]:	0,576	0,899	0,884	1,023	1,05	1,216	1,324	0,93
cc [-]:	-0,912	-0,995	-0,996	-0,998	-0,997	-0,999	-0,998	-0,996
T30 [s]:	0,545	0,603	1,11	0,933	0,983	1,127	0,935	0,798
cc [-]:	-0,869	-0,968	-0,994	-0,992	-0,986	-0,994	-0,98	-0,971

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	13	25	25	25	24	24	24
G [dB]:	-169,4	-157,67	-146,83	-136,58	-133,74	-130,94	-136,38

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2456,9	652,6	643,6	589,7	547,3	584,9	601,7
C80 [dB]:	-9,34	2,16	0,64	0,91	2,03	0,58	0,83
D50 [-]:	0,17	0,19	0,41	0,42	0,57	0,49	0,49

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	2,55	9,18	-0,18	0,35	-3,56	-2,02	-0,74
ST late [dB]:	9,95	6,06	1,25	1,65	-0,95	1,34	1,31
ST total [dB]:	10,14	10,78	3,58	4,09	0,92	2,99	3,41

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	5	5	6	5	5	4
EDT [s]:	0,59	1,1	1,23	1,39	1,37	1,27	1,13
D50:	0,19	0,41	0,42	0,57	0,49	0,49	0,49
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,49 (Fair)
% ALC	11,7
STI	0,5 (Fair)
% ALC	11,3
STIPA female	0,51 (Fair)
% ALC	11
RASTI	0,48 (Fair)
% ALC	12,3

STI male	0,5 (Fair)
% ALC	11,3

STIPA male	0,51 (Fair)
% ALC	10,9
STITEL	0,51 (Fair)
% ALC	11

<b>POSICIÓN 8</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	82,899	1,195	1,063	1,203	1,226	1,224	0,851	0,843
cc [-]:	-0,625	-0,988	-0,987	-0,992	-0,996	-0,997	-0,96	-0,995
T10 [s]:	0,02	0,864	1,283	1,391	1,396	1,314	1,129	0,828
cc [-]:	-0,957	-0,993	-0,998	-0,994	-0,997	-0,997	-1	-0,999
T20 [s]:	0,015	0,849	1,157	1,266	1,416	1,629	1,238	0,928
cc [-]:	-0,903	-0,995	-0,996	-0,998	-0,999	-0,997	-0,998	-0,998
T30 [s]:	0,014	0,812	1,155	1,331	1,47	1,688	1,436	1,076
cc [-]:	-0,889	-0,992	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,997	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>24	>34	>44	>50	>49	>47	>57
G [dB]:	-30,97	-21,56	-4,71	3,36	4,23	2,69	6,36

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	705,8	140,1	94,6	105,1	82	79,8	35,9
C80 [dB]:	-0,72	0,45	2,81	-0,11	2,18	2,3	7,81
D50 [-]:	0,46	0,19	0,22	0,23	0,44	0,51	0,79

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,17	10,95	8,13	5,48	2,19	1,85	-3,9
ST late [dB]:	-0,78	10,38	5,29	5,52	0,77	1,21	-6,16
ST total [dB]:	-0,54	13,24	9,89	8,48	4,61	4,53	-1,87

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	21	32	39	38	37	45	46
EDT [s]:	1,2	1,06	1,2	1,23	1,22	0,85	0,84
D50:	0,19	0,22	0,23	0,44	0,51	0,79	0,58
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	7	
STIPA female	0,59	(Fair)
% ALC	7	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,5	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STIPA male	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STITEL	0,61	(Good)
% ALC	6,3	

**POSICIÓN 9****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,539	1,096	1,367	1,279	1,257	1,453	1,144	0,185
cc [-]:	-0,934	-0,979	-0,993	-0,995	-0,991	-0,994	-0,959	-0,894
T10 [s]:	0,311	0,987	1,104	1,288	1,375	1,543	1,227	1,006
cc [-]:	-0,966	-0,99	-0,993	-0,996	-0,998	-0,998	-0,999	-0,99
T20 [s]:	0,064	0,861	1,211	1,416	1,354	1,587	1,276	1,084
cc [-]:	-0,946	-0,994	-0,998	-0,998	-0,999	-0,999	-1	-0,999
T30 [s]:	0,055	0,784	1,147	1,396	1,416	1,641	1,33	1,138
cc [-]:	-0,891	-0,99	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-1	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	18	29	37	48	51	46	45
G [dB]:	-165,3	-150,8	-139,2	-128,4	-124,4	-123,3	-124,6

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1903,5	374,9	90,9	71	50,6	75,7	36,1
C80 [dB]:	-1,16	-1,76	3,84	3,61	5,37	2,9	8,13
D50 [-]:	0,22	0,26	0,6	0,55	0,72	0,57	0,81

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,92	4,76	-2,93	-1,2	-4,15	-3,01	-7,01
ST late [dB]:	4,47	5,06	-3,01	-2,32	-4,87	-2,02	-8,13
ST total [dB]:	5,25	8,01	0,07	1,27	-1,47	0,52	-4,53

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	20	31	32	29	26	25
EDT [s]:	0,61	1,14	1,45	1,2	1,52	1,28	0,52
D50:	0,18	0,59	0,62	0,72	0,56	0,62	0,9
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,64	(Good)
% ALC	5,4	
STI	0,64	(Good)
% ALC	5,3	
STIPA female	0,63	(Good)
% ALC	5,5	
RASTI	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STI male	0,64	(Good)
% ALC	5,5	

STIPA male	0,64	(Good)
% ALC	5,4	
STITEL	0,67	(Good)
% ALC	4,4	

<b>POSICIÓN 9</b>
<b>EXTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	3,404	0,929	1,333	1,264	1,336	1,345	1,298	1,277
CC [-]:	-0,958	-0,982	-0,983	-0,998	-0,998	-0,997	-0,996	-0,986
T10 [s]:	2,21	1,236	0,927	1,708	1,291	1,2	1,078	1,238
CC [-]:	-0,967	-0,988	-0,993	-0,998	-0,997	-0,997	-0,999	-0,999
T20 [s]:	9,53	2,035	0,907	1,188	1,402	1,405	1,236	1,146
CC [-]:	-0,71	-0,954	-0,996	-0,995	-0,996	-0,998	-0,999	-0,999
T30 [s]:	9,225	2,034	0,849	0,995	0,995	1,505	1,281	1,561
CC [-]:	-0,705	-0,955	-0,989	-0,978	-0,982	-0,996	-0,995	-0,978

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	12	23	26	24	26	25	26
G [dB]:	-169,5	-156,7	-149,42	-137,46	-134,35	-131,77	-135,39

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2320,6	859,8	579,3	490,9	462,6	508,1	482,3
C80 [dB]:	-8,85	-0,01	-0,69	1,02	2,2	0,31	2,3
D50 [-]:	0,35	0,25	0,32	0,46	0,57	0,4	0,55

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-3,25	7,66	-0,9	0,49	-2,42	0	-3,04
ST late [dB]:	2,84	6,59	2,15	1,17	-1,04	1,61	-1,17
ST total [dB]:	3,17	10,1	3,93	3,87	1,32	3,89	1,01

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	4	6	7	7	7	7	6
EDT [s]:	0,93	1,33	1,26	1,34	1,35	1,3	1,28
D50:	0,25	0,32	0,46	0,57	0,4	0,55	0,62
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,51	(Fair)
% ALC	10,6	
STI	0,51	(Fair)
% ALC	11	
STIPA female	0,52	(Fair)
% ALC	10,2	
RASTI	0,48	(Fair)
% ALC	12,5	

STI male	0,51	(Fair)
% ALC	10,7	

STIPA male	0,52	(Fair)
% ALC	10,5	
STITEL	0,5	(Fair)
% ALC	11,2	



**POSICIÓN 9**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	1,092	0,805	1,46	1,239	1,319	1,103	0,835
cc [-]:	0	-0,989	-0,979	-0,997	-0,995	-0,997	-0,999	-0,994
T10 [s]:	-	0,733	0,883	1,313	1,457	1,589	1,232	0,78
cc [-]:	0	-0,938	-0,987	-0,998	-0,994	-0,995	-0,998	-0,997
T20 [s]:	-	0,588	1,097	1,358	1,486	1,722	1,542	1,039
cc [-]:	0	-0,982	-0,994	-0,998	-0,999	-0,999	-0,996	-0,995
T30 [s]:	-	0,538	1,027	1,364	1,501	1,746	1,623	1,18
cc [-]:	0	-0,982	-0,997	-0,999	-1	-1	-0,998	-0,996

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>19	26	>44	>51	>55	>59	>66
G [dB]:	-30,64	-20,01	-4,07	3,28	4,39	4,87	6,52

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	567,6	135,3	101,3	112,2	83,6	99,3	79,8
C80 [dB]:	-0,93	-1,87	-1,47	0,22	1,73	0,44	2,65
D50 [-]:	0,44	0,25	0,2	0,32	0,47	0,35	0,43

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,36	9,28	13,01	5,09	1,27	5,06	6,17
ST late [dB]:	0,03	9,42	9,78	4,98	1,06	5,34	4,43
ST total [dB]:	-0,95	11,79	14,68	8,05	4,18	8,21	8,4

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	13	31	40	44	49	55	49
EDT [s]:	1,09	0,8	1,46	1,24	1,32	1,1	0,83
D50:	0,25	0,2	0,32	0,47	0,35	0,43	0,5
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,54	(Fair)
% ALC	9,1	
STI	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	
STIPA female	0,54	(Fair)
% ALC	9	
RASTI	0,5	(Fair)
% ALC	11,7	

STI male	0,54	(Fair)
% ALC	9	

STIPA male	0,55	(Fair)
% ALC	8,9	
STITEL	0,51	(Fair)
% ALC	10,7	

**POSICIÓN 10****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	1,092	0,805	1,46	1,239	1,319	1,103	0,835
cc [-]:	0	-0,989	-0,979	-0,997	-0,995	-0,997	-0,999	-0,994
T10 [s]:	-	0,733	0,883	1,313	1,457	1,589	1,232	0,78
cc [-]:	0	-0,938	-0,987	-0,998	-0,994	-0,995	-0,998	-0,997
T20 [s]:	-	0,588	1,097	1,358	1,486	1,722	1,542	1,039
cc [-]:	0	-0,982	-0,994	-0,998	-0,999	-0,999	-0,996	-0,995
T30 [s]:	-	0,538	1,027	1,364	1,501	1,746	1,623	1,18
cc [-]:	0	-0,982	-0,997	-0,999	-1	-1	-0,998	-0,996

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	18	31	38	49	53	52	49
G [dB]:	-163,7	-149,1	-138,9	-126,6	-121,6	-116,8	-122,2

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2035,3	244,1	82,5	50	34,6	33,1	34,4
C80 [dB]:	-5,21	-1,18	4,28	6,25	8,27	8,56	8,73
D50 [-]:	0,32	0,37	0,64	0,71	0,82	0,81	0,79

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-4,12	3,14	-3,51	-2,75	-5,07	-5,84	-5,25
ST late [dB]:	0,3	3,43	-3,73	-5,86	-7,75	-8,06	-8,31
ST total [dB]:	1,27	6,55	-0,67	-1,04	-3,19	-3,8	-3,51

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	20	32	35	34	31	27
EDT [s]:	0,89	1,34	1,06	1,14	0,98	0,89	0,55
D50:	0,37	0,64	0,71	0,82	0,81	0,79	0,89
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,71	(Good)
% ALC	3,6	
STI	0,68	(Good)
% ALC	4,3	
STIPA female	0,71	(Good)
% ALC	3,5	
RASTI	0,69	(Good)
% ALC	4	

STI male	0,7	(Good)
% ALC	3,8	

STIPA male	0,72	(Good)
% ALC	3,5	
STITEL	0,72	(Good)
% ALC	3,5	

**POSICIÓN 10**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,135	0,958	1,338	1,504	1,184	1,263	1,208	1,335
cc [-]:	-0,895	-0,968	-0,989	-0,992	-0,985	-0,988	-0,988	-0,982
T10 [s]:	0,023	0,765	1,074	1,148	1,319	1,351	1,349	1,217
cc [-]:	-0,968	-0,988	-0,997	-0,998	-0,998	-0,999	-0,996	-0,99
T20 [s]:	0,024	0,724	1,08	1,114	1,32	1,251	1,272	0,994
cc [-]:	-0,967	-0,989	-0,997	-0,999	-0,999	-0,998	-0,997	-0,995
T30 [s]:	0,021	0,701	1,001	1,099	1,017	0,953	0,888	0,911
cc [-]:	-0,91	-0,986	-0,993	-0,997	-0,985	-0,977	-0,983	-0,993

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	25	26	26	25	25	25
G [dB]:	-167,8	-156,44	-148,55	-135,78	-130,89	-125,9	-131,64

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2376,5	675,1	558,5	507,8	459,7	461	482,8
C80 [dB]:	-8,15	-1,34	0,13	0,81	3,61	4,28	3,38
D50 [-]:	0,11	0,38	0,48	0,51	0,64	0,68	0,62

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	6,88	4,15	-0,89	-2,64	-3,75	-6,18	-4,45
ST late [dB]:	12,5	5,64	1,98	0,48	-2,22	-3,67	-2,81
ST total [dB]:	11,88	7,82	3,6	2,26	0,07	-1,73	-0,55

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	7	7	7	7	5
EDT [s]:	0,96	1,34	1,5	1,18	1,26	1,21	1,34
D50:	0,38	0,48	0,51	0,64	0,68	0,62	0,59
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,56	(Fair)
% ALC	8	
STI	0,54	(Fair)
% ALC	9,3	
STIPA female	0,57	(Fair)
% ALC	7,8	
RASTI	0,56	(Fair)
% ALC	8,1	

STI male	0,56	(Fair)
% ALC	8,2	

STIPA male	0,56	(Fair)
% ALC	8	
STITEL	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	

<b>POSICIÓN 10</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	92,353	0,897	1,068	1,542	1,352	1,192	1,063	0,913
CC [-]:	-0,45	-0,942	-0,988	-0,995	-0,999	-0,988	-0,997	-0,991
T10 [s]:	0,02	0,828	0,929	1,29	1,231	1,152	1,124	0,828
CC [-]:	-0,956	-0,94	-0,997	-0,997	-0,999	-0,99	-0,996	-0,992
T20 [s]:	0,015	0,713	1,171	1,256	1,421	1,529	1,348	1,003
CC [-]:	-0,902	-0,992	-0,994	-0,998	-0,997	-0,995	-0,996	-0,995
T30 [s]:	0,015	0,64	1,117	1,302	1,474	1,641	1,431	1,144
CC [-]:	-0,888	-0,984	-0,996	-0,999	-0,999	-0,998	-0,998	-0,995

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>24	29	>44	>51	>50	>51	>57
G [dB]:	-30,26	-17,87	-5,92	1,91	2,48	1,91	2,69

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	566,2	107,7	103,4	117,5	83,6	90,1	88,3
C80 [dB]:	0,52	-0,09	-0,35	-1,01	2,03	0,8	2,08
D50 [-]:	0,49	0,36	0,3	0,31	0,51	0,42	0,41

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	0,37	9,18	8,31	4,05	2,2	2,75	7,66
ST late [dB]:	-0,85	7,73	7,92	4,66	0,74	1,9	4,82
ST total [dB]:	0,7	11,56	11,15	7,38	4,53	5,35	9,48

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	15	31	39	39	40	46	47
EDT [s]:	0,9	1,07	1,54	1,35	1,19	1,06	0,91
D50:	0,36	0,3	0,31	0,51	0,42	0,41	0,62
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,53	(Fair)
% ALC	9,5	
STI	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	
STIPA female	0,51	(Fair)
% ALC	10,9	
RASTI	0,48	(Fair)
% ALC	12,4	

STI male	0,53	(Fair)
% ALC	9,5	

STIPA male	0,51	(Fair)
% ALC	10,9	
STITEL	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	

**POSICIÓN 11****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,855	1,089	1,281	1,346	1,248	1,207	1,301	0,471
cc [-]:	-0,963	-0,97	-0,974	-0,997	-0,98	-0,96	-0,98	-0,927
T10 [s]:	0,009	1,968	1,037	1,3	1,236	1,448	1,247	1,11
cc [-]:	-0,98	-0,973	-0,994	-0,997	-0,992	-0,992	-0,983	-0,981
T20 [s]:	0,518	0,967	1,209	1,313	1,333	1,38	1,145	0,962
cc [-]:	-0,961	-0,995	-0,997	-0,999	-0,998	-0,999	-0,997	-0,993
T30 [s]:	0,505	0,879	1,197	1,375	1,401	1,417	1,211	0,979
cc [-]:	-0,945	-0,98	-0,997	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	19	30	36	50	51	54	51
G [dB]:	-163,2	-148,5	-140,5	-127,8	-122,8	-116,6	-122,6

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2113,3	293,6	117	66,1	41,4	30,6	35
C80 [dB]:	-2,48	-0,89	1,41	3,62	7,01	8,63	7,25
D50 [-]:	0,18	0,35	0,49	0,63	0,79	0,84	0,79

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	1,68	4,05	-1,79	-1,56	-3,94	-7,19	-6,04
ST late [dB]:	4,31	5,41	0,07	-2,63	-5,86	-8,42	-7,47
ST total [dB]:	6,03	8,14	2,12	0,98	-1,82	-4,74	-3,7

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	10	18	32	34	37	33	29
EDT [s]:	1,09	1,28	1,35	1,25	1,21	1,3	0,47
D50 :	0,35	0,49	0,63	0,79	0,84	0,79	0,91
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,7	(Good)
% ALC	3,9	
STI	0,66	(Good)
% ALC	4,8	
STIPA female	0,7	(Good)
% ALC	3,8	
RASTI	0,68	(Good)
% ALC	4,3	

STI male	0,69	(Good)
% ALC	4,1	

STIPA male	0,7	(Good)
% ALC	3,9	
STITEL	0,7	(Good)
% ALC	3,9	

<b>POSICIÓN 11</b>
<b>EXTERNO MLS</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,175	0,982	1,169	1,375	1,085	1,258	1,302	1,435
cc [-]:	-0,968	-0,958	-0,965	-0,996	-0,981	-0,932	-0,974	-0,948
T10 [s]:	0,287	1,142	0,989	1,249	1,186	1,342	1,262	1,475
cc [-]:	-0,983	-0,989	-0,985	-0,996	-0,989	-0,995	-0,983	-0,985
T20 [s]:	0,272	0,898	1,015	1,287	0,877	0,945	1,079	0,836
cc [-]:	-0,974	-0,994	-0,992	-0,997	-0,992	-0,987	-0,994	-0,969
T30 [s]:	0,268	0,832	0,907	1,164	0,8	0,869	1,189	0,782
cc [-]:	-0,956	-0,988	-0,992	-0,992	-0,978	-0,981	-0,994	-0,974

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	20	24	27	26	27	25	26
G [dB]:	-169,8	-155,42	-148,38	-135,58	-130,39	-123,9	-129,8

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1893,9	732,1	556,8	490	461,9	451,7	475,7
C80 [dB]:	-2,54	-2,09	-0,15	1,91	4	4,84	3,88
D50 [-]:	0,29	0,32	0,4	0,5	0,67	0,72	0,67

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	3,03	3,81	-1,61	-2,02	-4,49	-8,09	-6,25
ST late [dB]:	6,04	6,37	2,14	-0,25	-2,79	-4,53	-3,48
ST total [dB]:	7,14	8,46	3,5	1,97	-0,55	-2,94	-1,64

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	4	6	7	7	7	7	5
EDT [s]:	0,98	1,17	1,37	1,09	1,26	1,3	1,43
D50:	0,32	0,4	0,5	0,67	0,72	0,67	0,64
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	
STI	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	
STIPA female	0,59	(Fair)
% ALC	7	
RASTI	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	

STIPA male	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	
STITEL	0,55	(Fair)
% ALC	8,9	

**POSICIÓN 11**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	66,276	1,125	1,127	1,421	1,42	1,376	1,089	0,971
CC [-]:	-0,699	-0,915	-0,981	-0,989	-0,995	-0,998	-0,998	-0,996
T10 [s]:	0,022	0,791	1,026	1,247	1,36	1,354	1,146	0,831
CC [-]:	-0,95	-0,947	-0,998	-0,997	-0,999	-0,996	-0,999	-0,998
T20 [s]:	0,016	1,098	1,093	1,323	1,416	1,583	1,372	0,974
CC [-]:	-0,896	-0,99	-0,997	-0,999	-0,999	-0,998	-0,996	-0,997
T30 [s]:	0,016	0,664	1,015	1,41	1,46	1,647	1,489	1,108
CC [-]:	-0,882	-0,976	-0,996	-0,999	-1	-0,999	-0,998	-0,996

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>31	>33	>45	>51	>49	>54	>63
G [dB]:	-29,85	-19,08	-5,73	1,41	2,38	3,1	5,84

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	511,5	113,5	117,1	130,5	109,8	105,3	69
C80 [dB]:	1,13	-0,38	-2,58	-3,02	-0,27	0,68	3,59
D50 [-]:	0,52	0,34	0,23	0,17	0,31	0,38	0,54

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,85	5,63	9,4	6,88	3,51	6,44	1,63
ST late [dB]:	-1,82	5,51	11,34	8,44	4,14	5,58	-1,06
ST total [dB]:	-0,92	8,58	13,56	10,73	6,84	9,03	3,5

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	21	32	40	38	43	51	47
EDT [s]:	1,12	1,13	1,42	1,42	1,38	1,09	0,97
D50:	0,34	0,23	0,17	0,31	0,38	0,54	0,54
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,52	(Fair)
% ALC	10,2	
STI	0,53	(Fair)
% ALC	9,7	
STIPA female	0,5	(Fair)
% ALC	11,6	
RASTI	0,49	(Fair)
% ALC	11,8	

STI male	0,52	(Fair)
% ALC	10,4	

STIPA male	0,5	(Fair)
% ALC	11,4	
STITEL	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	

**POSICIÓN 12****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,771	0,988	1,212	1,273	1,24	1,422	1,314	0,673
cc [-]:	-0,987	-0,991	-0,983	-0,997	-0,995	-0,997	-0,996	-0,855
T10 [s]:	0,57	0,909	0,994	1,35	1,389	1,532	1,252	1,16
cc [-]:	-0,987	-0,99	-0,996	-0,999	-0,997	-0,999	-0,999	-0,998
T20 [s]:	0,539	0,709	1,069	1,26	1,49	1,535	1,302	1,12
cc [-]:	-0,989	-0,99	-0,996	-0,998	-0,999	-1	-1	-1
T30 [s]:	0,512	0,688	1,06	1,365	1,508	1,569	1,333	1,132
cc [-]:	-0,978	-0,992	-0,998	-0,998	-1	-1	-1	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	33	37	47	45	43	42
G [dB]:	-165,8	-149,4	-140,6	-128,7	-125,8	-124,1	-128

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2105,3	217,2	123	78,8	57,2	88,1	70,1
C80 [dB]:	-1,96	-1,23	0,14	3,4	5,39	2,74	4,31
D50 [-]:	0,34	0,24	0,39	0,51	0,69	0,46	0,62

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	1,46	7,03	-0,46	1,29	-2,49	-0,08	-1,85
ST late [dB]:	2,68	5,11	0,12	-0,64	-3,79	-0,63	-2,68
ST total [dB]:	-1,56	8,51	2,84	3,44	-0,07	2,67	0,76

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	13	18	29	28	26	25	25
EDT [s]:	0,99	1,21	1,27	1,24	1,42	1,31	0,67
D50:	0,24	0,39	0,51	0,69	0,46	0,62	0,88
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
STI	0,6	(Fair)
% ALC	6,6	
STIPA female	0,61	(Good)
% ALC	6,4	
RASTI	0,55	(Fair)
% ALC	8,9	

STI male	0,6	(Good)
% ALC	6,4	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,4	
STITEL	0,64	(Good)
% ALC	5,2	



**POSICIÓN 12****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,813	0,917	1,223	1,171	1,234	1,41	1,174	1,13
cc [-]:	-0,983	-0,992	-0,991	-0,995	-0,998	-0,997	-0,998	-0,993
T10 [s]:	1,377	0,807	0,93	1,108	1,196	1,274	1,225	0,993
cc [-]:	-0,975	-0,989	-0,997	-0,995	-0,998	-0,999	-1	-0,998
T20 [s]:	0,389	0,723	0,854	1,104	1,275	1,216	1,364	0,908
cc [-]:	-0,962	-0,989	-0,998	-0,994	-0,999	-0,999	-0,999	-0,994
T30 [s]:	0,375	0,719	0,824	0,923	1,176	1,896	0,985	0,817
cc [-]:	-0,934	-0,989	-0,998	-0,979	-0,992	-0,992	-0,983	-0,97

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	13	24	26	26	25	25	25
G [dB]:	-171,5	-156,88	-148,73	-136,4	-133,4	-131,25	-136,52

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2563,6	892	598,7	520,4	491,3	530,2	536
C80 [dB]:	-5,34	-1,98	-1,19	1,02	2,54	0,31	1,24
D50 [-]:	0,25	0,23	0,3	0,43	0,56	0,4	0,44

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	1,71	9,26	0,91	1,03	-2,37	-0,49	-0,29
ST late [dB]:	6	9,56	2,73	1,87	-0,75	1,47	0,68
ST total [dB]:	4,9	12,21	4,94	4,5	1,5	3,62	3,23

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	3	6	7	7	7	7	5
EDT [s]:	0,92	1,22	1,17	1,23	1,41	1,17	1,13
D50:	0,23	0,3	0,43	0,56	0,4	0,44	0,51
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,49	(Fair)
% ALC	11,8	
STI	0,48	(Fair)
% ALC	12,4	
STIPA female	0,5	(Fair)
% ALC	11,3	
RASTI	0,48	(Fair)
% ALC	12,5	

STI male	0,49	(Fair)
% ALC	11,7	

STIPA male	0,5	(Fair)
% ALC	11,4	
STITEL	0,49	(Fair)
% ALC	11,9	

**POSICIÓN 12**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	1,097	1,136	0,952	1,281	1,378	1,258	1,039	0,901
cc [-]:	-0,957	-0,993	-0,986	-0,996	-0,995	-0,996	-0,997	-0,997
T10 [s]:	1,805	0,633	1,07	1,399	1,342	1,348	1,189	0,807
cc [-]:	-0,955	-0,959	-0,99	-0,999	-0,996	-0,996	-0,997	-0,998
T20 [s]:	0,278	0,615	1,126	1,332	1,451	1,567	1,352	0,98
cc [-]:	-0,752	-0,991	-0,997	-0,998	-0,999	-0,998	-0,998	-0,996
T30 [s]:	0,264	0,589	1,129	1,332	1,477	1,673	1,481	1,103
cc [-]:	-0,739	-0,986	-0,999	-0,999	-1	-0,998	-0,998	-0,996

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>14	25	>45	>51	>52	>53	>60
G [dB]:	-30,3	-20,66	-5,33	2,69	3,81	5,55	6,19

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	535,2	132,2	98,8	98,3	67,6	68,9	65,1
C80 [dB]:	0,11	-0,69	-0,23	0,9	3,62	3,42	4,31
D50 [-]:	0,46	0,35	0,28	0,37	0,61	0,57	0,56

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,92	4,58	8,26	4,03	-1,43	-0,88	1,59
ST late [dB]:	-1,52	3,91	5,97	2,6	-1,82	-1,27	-1,05
ST total [dB]:	-2,61	6,65	10,26	6,4	1,4	1,94	3,48

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	33	40	41	43	49	48
EDT [s]:	1,14	0,95	1,28	1,38	1,26	1,04	0,9
D50:	0,35	0,28	0,37	0,61	0,57	0,56	0,65
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	
STI	0,57	(Fair)
% ALC	7,8	
STIPA female	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
RASTI	0,53	(Fair)
% ALC	9,7	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

STIPA male	0,6	(Good)
% ALC	6,6	
STITEL	0,59	(Fair)
% ALC	7	

**POSICIÓN 13****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,839	0,77	1,027	1,065	1,163	1,342	1,02	0,75
cc [-]:	-0,993	-0,98	-0,975	-0,991	-0,954	-0,987	-0,932	-0,916
T10 [s]:	0,493	0,861	1,026	1,429	1,488	1,486	1,243	1,008
cc [-]:	-0,932	-0,962	-0,985	-0,996	-0,997	-0,999	-0,999	-0,996
T20 [s]:	0,306	0,755	1,246	1,357	1,406	1,535	1,243	1,026
cc [-]:	-0,897	-0,99	-0,995	-0,999	-0,999	-0,999	-1	-0,999
T30 [s]:	0,291	0,786	1,234	1,394	1,459	1,599	1,305	1,088
cc [-]:	-0,909	-0,989	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	12	32	39	48	51	50	50
G [dB]:	-164,1	-148,4	-137,1	-127,6	-124,2	-122,3	-124,3

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2348,1	221,1	64	50	37,5	58	34,1
C80 [dB]:	-5,98	3,05	6,15	6,42	7,68	4,99	8,11
D50 [-]:	0,18	0,61	0,7	0,73	0,8	0,68	0,81

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-9,46	3,75	-3,52	-2,53	-6,73	-2,69	-6,77
ST late [dB]:	-0,96	0,44	-5,69	-5,65	-7,79	-4,13	-8,32
ST total [dB]:	-0,61	5,5	-1,48	-0,8	-4,21	-0,34	-4,47

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	21	31	34	33	32	28
EDT [s]:	0,77	1,03	1,06	1,16	1,34	1,02	0,75
D50:	0,61	0,7	0,73	0,8	0,68	0,81	0,86
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,69	(Good)
% ALC	4	
STI	0,68	(Good)
% ALC	4,2	
STIPA female	0,69	(Good)
% ALC	4	
RASTI	0,64	(Good)
% ALC	5,3	

STI male	0,69	(Good)
% ALC	4,1	

STIPA male	0,7	(Good)
% ALC	3,9	
STITEL	0,71	(Good)
% ALC	3,6	

**POSICIÓN 13****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,795	0,854	1,006	1,017	1,179	1,594	1,021	1,121
cc [-]:	-0,992	-0,981	-0,979	-0,982	-0,969	-0,982	-0,905	-0,934
T10 [s]:	0,399	0,849	0,904	1,132	1,297	1,426	1,236	1,36
cc [-]:	-0,961	-0,984	-0,99	-0,996	-0,999	-1	-0,996	-0,998
T20 [s]:	0,303	0,86	0,74	1,225	1,47	1,542	1,175	0,813
cc [-]:	-0,893	-0,986	-0,991	-0,998	-0,998	-0,999	-0,998	-0,988
T30 [s]:	0,297	0,697	1,164	1,181	0,935	1,161	1,368	0,728
cc [-]:	-0,88	-0,937	-0,989	-0,992	-0,977	-0,986	-0,991	-0,98

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	13	26	27	25	25	25	25
G [dB]:	-170,4	-156,12	-145,18	-135,29	-132,13	-130,47	-132,57

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2244,5	687,6	515,2	513,2	479,4	515,7	502,9
C80 [dB]:	-7,37	0,11	3,14	2,94	3,74	2,34	4,17
D50 [-]:	0,29	0,48	0,58	0,62	0,66	0,57	0,68

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-6,71	4,19	-3,35	-3,08	-6,13	-4,23	-7,32
ST late [dB]:	1,06	4,72	-1,88	-1,56	-3,23	-1,64	-3,57
ST total [dB]:	1,46	7,54	0,45	0,77	-1,44	0,26	-2,04

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	6	7	6	6	5
EDT [s]:	0,85	1,01	1,02	1,18	1,59	1,02	1,12
D50:	0,48	0,58	0,62	0,66	0,57	0,68	0,63
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,58	(Fair)
% ALC	7,6	
STI	0,56	(Fair)
% ALC	8	
STIPA female	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	
RASTI	0,56	(Fair)
% ALC	8,3	

STI male	0,57	(Fair)
% ALC	7,7	

STIPA male	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	
STITEL	0,57	(Fair)
% ALC	7,7	

**POSICIÓN 13**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,829	1,07	1,222	1,093	1,179	0,932	0,96
cc [-]:	0	-0,986	-0,991	-0,993	-0,992	-0,995	-0,991	-0,996
T10 [s]:	0,013	0,737	1,076	1,143	1,336	1,46	1,036	0,956
cc [-]:	-0,97	-0,987	-0,997	-0,998	-0,996	-0,997	-0,997	-0,996
T20 [s]:	0,01	0,735	1,068	1,394	1,428	1,572	1,263	1,09
cc [-]:	-0,907	-0,996	-0,999	-0,997	-0,997	-0,999	-0,997	-0,997
T30 [s]:	0,01	0,686	1,02	1,358	1,485	1,606	1,401	1,179
cc [-]:	-0,907	-0,99	-0,999	-0,999	-0,999	-1	-0,997	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>24	27	>45	>50	>48	>47	>56
G [dB]:	-30,43	-20	-5,43	2,46	2,77	0,61	3,86

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	603,7	107,1	105,1	104	93,7	89,5	76,5
C80 [dB]:	-0,29	2,54	-0,62	-0,94	0,47	1,24	3,49
D50 [-]:	0,53	0,41	0,21	0,34	0,36	0,43	0,45

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	3,21	12,27	9,67	6,3	3,95	2,88	5,67
ST late [dB]:	3,24	10,1	7,52	5,97	2,94	1,97	2,4
ST total [dB]:	-1,74	11,11	11,35	9,24	6,52	5,44	7,34

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	32	39	37	37	45	46
EDT [s]:	0,83	1,07	1,22	1,09	1,18	0,93	0,96
D50:	0,41	0,21	0,34	0,36	0,43	0,45	0,51
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,54	(Fair)
% ALC	9	
STI	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	
STIPA female	0,52	(Fair)
% ALC	10,2	
RASTI	0,49	(Fair)
% ALC	11,8	

STI male	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	

STIPA male	0,53	(Fair)
% ALC	9,8	
STITEL	0,54	(Fair)
% ALC	8,9	

**POSICIÓN 14****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,949	0,945	1,25	1,164	1,261	1,328	0,752	0,627
cc [-]:	-0,987	-0,928	-0,988	-0,977	-0,961	-0,971	-0,896	-0,928
T10 [s]:	0,633	0,701	1,2	1,374	1,336	1,255	1,338	1,226
cc [-]:	-0,987	-0,977	-0,995	-0,999	-0,99	-0,986	-0,991	-0,973
T20 [s]:	0,651	0,808	1,225	1,265	1,283	1,348	1,127	0,956
cc [-]:	-0,98	-0,995	-0,998	-0,998	-0,998	-0,996	-0,995	-0,991
T30 [s]:	0,64	0,78	1,091	1,309	1,339	1,402	1,187	0,993
cc [-]:	-0,969	-0,993	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998	-0,998	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	34	39	50	50	49	48
G [dB]:	-161,8	-148,4	-137,9	-126	-122,6	-118,1	-120,9

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2241,2	184,4	70,6	46,4	41,2	36,6	22,7
C80 [dB]:	-6,25	-0,09	6,16	6,39	7,03	7,57	10,4
D50 [-]:	0,17	0,4	0,69	0,76	0,8	0,8	0,88

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	0,86	7,06	-3,38	-1,86	-3,5	-5,97	-8,37
ST late [dB]:	7,4	6,88	-4,69	-5,35	-5,92	-7,49	-10,6
ST total [dB]:	7,81	10,04	-1,13	-0,24	-1,53	-3,65	-6,33

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	14	21	32	33	32	30	27
EDT [s]:	0,94	1,25	1,16	1,26	1,33	0,75	0,63
D50:	0,4	0,69	0,76	0,8	0,8	0,88	0,89
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,72	(Good)
% ALC	3,4	
STI	0,7	(Good)
% ALC	3,9	
STIPA female	0,73	(Good)
% ALC	3,3	
RASTI	0,7	(Good)
% ALC	3,8	

STI male	0,71	(Good)
% ALC	3,6	

STIPA male	0,72	(Good)
% ALC	3,4	
STITEL	0,74	(Good)
% ALC	3,1	

**POSICIÓN 14**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,671	1,05	1,145	0,994	0,805	1,454	0,656	0,564
cc [-]:	-0,979	-0,917	-0,99	-0,978	-0,949	-0,981	-0,914	-0,912
T10 [s]:	0,023	0,466	1,081	1,123	1,677	1,173	1,496	1,331
cc [-]:	-0,99	-0,941	-0,996	-0,996	-0,996	-0,978	-0,982	-0,974
T20 [s]:	0,27	0,617	1,067	0,987	1,497	1,13	1,163	1,128
cc [-]:	-0,927	-0,974	-0,997	-0,994	-0,989	-0,997	-0,995	-0,993
T30 [s]:	0,257	0,485	0,976	0,912	0,785	1,134	0,756	1,83
cc [-]:	-0,9	-0,968	-0,992	-0,991	-0,974	-0,998	-0,967	-0,956

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	25	26	26	24	26	26
G [dB]:	-169,1	-155,69	-146,23	-134,2	-130,15	-127,23	-129,54

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2365,5	645,7	508,4	496,6	473,9	490,2	474,8
C80 [dB]:	-7,91	-1,87	2,92	3,44	4,55	3,32	5,04
D50 [-]:	0,19	0,29	0,57	0,63	0,71	0,63	0,73

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	3,94	8,19	-3,65	-2,78	-4,31	-4,6	-7,69
ST late [dB]:	7,93	9,55	-1,67	-1,82	-3,28	-2,31	-4,53
ST total [dB]:	8,8	11,94	0,33	0,75	-0,75	-0,29	-2,82

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	6	7	7	7	6
EDT [s]:	1,05	1,15	0,99	0,8	1,45	0,66	0,56
D50:	0,29	0,57	0,63	0,71	0,63	0,73	0,73
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,6	(Fair)
% ALC	6,6	
STI	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	
STIPA female	0,61	(Good)
% ALC	6,4	
RASTI	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

STI male	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	

STIPA male	0,6	(Good)
% ALC	6,6	
STITEL	0,6	(Fair)
% ALC	6,8	

**POSICIÓN 14****IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	1,276	1,109	1,237	1,264	1,345	1,195	0,931
cc [-]:	0	-0,984	-0,985	-0,994	-0,996	-0,994	-0,997	-0,992
T10 [s]:	0,011	1,032	1,143	1,225	1,28	1,54	1,224	0,953
cc [-]:	-0,969	-0,945	-0,987	-0,994	-0,995	-0,993	-0,997	-0,998
T20 [s]:	0,008	0,984	1,132	1,293	1,519	1,683	1,516	1,096
cc [-]:	-0,908	-0,965	-0,997	-0,998	-0,997	-0,998	-0,997	-0,997
T30 [s]:	0,008	0,581	1,264	1,351	1,539	1,742	1,576	1,161
cc [-]:	-0,908	-0,961	-0,994	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>23	>31	41	>49	>49	>54	>60
G [dB]:	-31,15	-21,7	-7,35	1,01	1,53	3,26	2,92

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	604,6	131,6	103,9	107	103,7	105,3	85,8
C80 [dB]:	-0,07	0,82	-0,37	-0,2	0,23	0,29	1,98
D50 [-]:	0,47	0,39	0,23	0,26	0,38	0,43	0,49

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,94	8,65	8,03	7,65	7,55	10,19	6,02
ST late [dB]:	-0,22	6,91	5,65	6,26	6,99	8,8	3,27
ST total [dB]:	-0,54	10,47	10,01	10,01	10,3	12,56	7,86

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	18	28	38	39	44	50	45
EDT [s]:	1,28	1,11	1,24	1,26	1,34	1,19	0,93
D50:	0,39	0,23	0,26	0,38	0,43	0,49	0,58
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	
STI	0,55	(Fair)
% ALC	8,5	
STIPA female	0,57	(Fair)
% ALC	8	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,6	

STI male	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	

STIPA male	0,57	(Fair)
% ALC	7,9	
STITEL	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	



**POSICIÓN 15****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,991	0,919	1,421	1,31	1,109	1,778	1,031	0,548
cc [-]:	-0,992	-0,939	-0,983	-0,986	-0,983	-0,962	-0,948	-0,944
T10 [s]:	0,78	0,706	0,96	1,229	1,171	1,289	1,448	1,302
cc [-]:	-0,979	-0,984	-0,984	-0,993	-0,992	-0,942	-0,984	-0,972
T20 [s]:	0,766	0,881	1,063	1,343	1,28	1,253	1,087	0,979
cc [-]:	-0,973	-0,989	-0,996	-0,997	-0,995	-0,993	-0,991	-0,988
T30 [s]:	0,383	0,866	1,067	1,369	1,378	1,381	1,144	0,995
cc [-]:	-0,942	-0,994	-0,998	-0,999	-0,997	-0,996	-0,997	-0,996

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	20	34	40	50	52	53	53
G [dB]:	-163,3	-147,9	-137,8	-126,3	-122,6	-117,5	-120,7

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1731,5	190,4	70,7	47,8	40,4	40,5	24,2
C80 [dB]:	-2,81	-0,06	4,9	5,51	7,17	6,68	9,41
D50 [-]:	0,29	0,4	0,69	0,74	0,77	0,78	0,87

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	5,65	7,78	-3,89	-2,95	-3,32	-5,5	-7,33
ST late [dB]:	2,3	7,18	-3,59	-5,21	-6,25	-6,1	-9,58
ST total [dB]:	7,1	10,5	-0,83	-0,91	-1,55	-2,78	-5,3

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	14	21	33	35	36	34	29
EDT [s]:	0,92	1,42	1,31	1,11	1,78	1,03	0,55
D50:	0,4	0,69	0,74	0,77	0,78	0,87	0,9
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,71	(Good)
% ALC	3,6	
STI	0,69	(Good)
% ALC	4,1	
STIPA female	0,72	(Good)
% ALC	3,5	
RASTI	0,69	(Good)
% ALC	4	

STI male	0,7	(Good)
% ALC	3,9	

STIPA male	0,72	(Good)
% ALC	3,5	
STITEL	0,73	(Good)
% ALC	3,3	

**POSICIÓN 15****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,528	1,188	1,354	1,184	1,155	1,523	1,402	1,292
cc [-]:	-0,973	-0,903	-0,987	-0,991	-0,966	-0,941	-0,894	-0,902
T10 [s]:	0,352	0,479	1,181	1,075	1,41	1,418	1,98	1,691
cc [-]:	-0,989	-0,942	-0,991	-0,995	-0,997	-0,966	-0,98	-0,973
T20 [s]:	0,261	0,357	0,846	1,125	1,172	1,176	1,105	1,102
cc [-]:	-0,951	-0,987	-0,994	-0,999	-0,997	-0,992	-0,986	-0,977
T30 [s]:	0,256	0,321	1,239	1,073	1,142	1,053	0,755	0,65
cc [-]:	-0,938	-0,984	-0,994	-0,997	-0,998	-0,992	-0,968	-0,954

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	24	27	27	26	26	26	26
G [dB]:	-168,1	-154,92	-145,46	-134,02	-130,03	-125,41	-128,12

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1204,3	604	467,4	462,2	471,8	474,7	457,8
C80 [dB]:	0,54	-1,5	2,83	3,31	4,4	4,17	5,13
D50 [-]:	0,51	0,33	0,6	0,63	0,68	0,69	0,75

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	0,58	6,46	-4,3	-4,09	-5,61	-6,81	-8,67
ST late [dB]:	0,2	7,96	-1,42	-2,53	-3,64	-3,52	-4,8
ST total [dB]:	2,49	10,2	0,3	-0,23	-1,5	-1,85	-3,31

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	7	7	7	7	6
EDT [s]:	1,19	1,35	1,18	1,16	1,52	1,4	1,29
D50:	0,33	0,6	0,63	0,68	0,69	0,75	0,72
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	7	
STIPA female	0,62	(Good)
% ALC	6	
RASTI	0,6	(Fair)
% ALC	6,6	

STI male	0,61	(Good)
% ALC	6,4	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
STITEL	0,6	(Good)
% ALC	6,6	

**POSICIÓN 15**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	1,276	1,109	1,237	1,264	1,345	1,195	0,931
cc [-]:	0	-0,984	-0,985	-0,994	-0,996	-0,994	-0,997	-0,992
T10 [s]:	0,011	1,032	1,143	1,225	1,28	1,54	1,224	0,953
cc [-]:	-0,969	-0,945	-0,987	-0,994	-0,995	-0,993	-0,997	-0,998
T20 [s]:	0,008	0,984	1,132	1,293	1,519	1,683	1,516	1,096
cc [-]:	-0,908	-0,965	-0,997	-0,998	-0,997	-0,998	-0,997	-0,997
T30 [s]:	0,008	0,581	1,264	1,351	1,539	1,742	1,576	1,161
cc [-]:	-0,908	-0,961	-0,994	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>23	>31	41	>49	>49	>54	>60
G [dB]:	-31,15	-21,7	-7,35	1,01	1,53	3,26	2,92

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	604,6	131,6	103,9	107	103,7	105,3	85,8
C80 [dB]:	-0,07	0,82	-0,37	-0,2	0,23	0,29	1,98
D50 [-]:	0,47	0,39	0,23	0,26	0,38	0,43	0,49

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,94	8,65	8,03	7,65	7,55	10,19	6,02
ST late [dB]:	-0,22	6,91	5,65	6,26	6,99	8,8	3,27
ST total [dB]:	-0,54	10,47	10,01	10,01	10,3	12,56	7,86

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	18	28	38	39	44	50	45
EDT [s]:	1,28	1,11	1,24	1,26	1,34	1,19	0,93
D50:	0,39	0,23	0,26	0,38	0,43	0,49	0,58
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	
STI	0,55	(Fair)
% ALC	8,5	
STIPA female	0,57	(Fair)
% ALC	8	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,6	

STI male	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	

STIPA male	0,57	(Fair)
% ALC	7,9	
STITEL	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	

**POSICIÓN 16****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,813	0,925	1,033	1,026	1,144	1,339	1,095	0,778
CC [-]:	-0,993	-0,983	-0,976	-0,994	-0,964	-0,988	-0,963	-0,927
T10 [s]:	0,685	0,41	1,007	1,215	1,351	1,543	1,194	1,035
CC [-]:	-0,99	-0,986	-0,994	-0,996	-0,998	-0,998	-0,998	-0,998
T20 [s]:	0,643	0,825	1,11	1,334	1,349	1,546	1,26	1,044
CC [-]:	-0,983	-0,98	-0,998	-0,998	-0,999	-1	-0,999	-0,998
T30 [s]:	0,669	0,783	1,175	1,391	1,42	1,594	1,326	1,06
CC [-]:	-0,961	-0,987	-0,998	-0,999	-0,999	-1	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	16	35	42	51	52	51	51
G [dB]:	-166,5	-149,1	-136,89	-126,87	-123,86	-122,5	-125,1

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	1911,7	148,6	59,1	51,6	40,6	57,2	35,8
C80 [dB]:	-4,06	3,52	5,08	5,18	6,9	4,74	7,56
D50 [-]:	0,25	0,63	0,65	0,68	0,76	0,68	0,79

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	8,91	4,06	-3,01	-2,24	-6,19	-3,69	-6,06
ST late [dB]:	7,2	1,47	-5,29	-5,14	-7,04	-4,48	-7,63
ST total [dB]	8,56	5,77	-1,01	-0,48	-3,53	-1,07	-3,76

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	15	24	33	34	35	33	28
EDT [s]:	0,92	1,03	1,03	1,14	1,34	1,09	0,78
D50 :	0,63	0,65	0,68	0,76	0,68	0,79	0,85
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,68	(Good)
% ALC	4,2	
STI	0,68	(Good)
% ALC	4,4	
STIPA female	0,68	(Good)
% ALC	4,3	
RASTI	0,64	(Good)
% ALC	5,5	

STI male	0,68	(Good)
% ALC	4,3	

STIPA male	0,68	(Good)
% ALC	4,3	
STITEL	0,71	(Good)
% ALC	3,7	

**POSICIÓN 16****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,803	0,947	1,107	1,025	1,308	1,516	1,191	0,906
CC [-]:	-0,984	-0,982	-0,983	-0,994	-0,906	-0,986	-0,929	-0,984
T10 [s]:	0,682	0,414	0,932	1,224	1,492	1,344	1,245	1,123
CC [-]:	-0,967	-0,989	-0,996	-0,993	-0,999	-0,997	-0,999	-0,997
T20 [s]:	0,214	0,565	0,909	1,221	1,454	1,455	1,307	1,175
CC [-]:	-0,967	-0,978	-0,999	-0,997	-0,997	-0,999	-0,999	-0,999
T30 [s]:	0,207	0,578	0,912	1,122	1,001	1,097	0,931	1,504
CC [-]:	-0,947	-0,978	-0,995	-0,995	-0,978	-0,983	-0,976	-0,986

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	12	26	27	26	25	25	26
G [dB]:	-170,2	-156,06	-145,07	-134,2	-131,1	-130,1	-132,2

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2465,2	646,1	475,6	454,7	432,7	457,3	430,7
C80 [dB]:	-8,71	0,4	2,59	3,45	4,68	2,73	4,81
D50 [-]:	0,13	0,5	0,57	0,61	0,72	0,6	0,72

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	4,47	3,8	-3,07	-3,26	-8,19	-4,53	-7,16
ST late [dB]:	9,01	4,88	-1,76	-2,62	-4,21	-1,97	-4,41
ST total [dB]	9,96	7,47	0,63	0,08	-2,75	-0,05	-2,56

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	7	8	7	8	7
EDT [s]:	0,95	1,11	1,03	1,31	1,52	1,19	0,91
D50 :	0,5	0,57	0,61	0,72	0,6	0,72	0,65
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	
STI	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	
STIPA female	0,6	(Fair)
% ALC	6,6	
RASTI	0,57	(Fair)
% ALC	7,8	

STI male	0,59	(Fair)
% ALC	7	

STIPA male	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	
STITEL	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	

**POSICIÓN 16**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,829	1,07	1,222	1,093	1,179	0,932	0,96
cc [-]:	0	-0,986	-0,991	-0,993	-0,992	-0,995	-0,991	-0,996
T10 [s]:	0,013	0,737	1,076	1,143	1,336	1,46	1,036	0,956
cc [-]:	-0,97	-0,987	-0,997	-0,998	-0,996	-0,997	-0,997	-0,996
T20 [s]:	0,01	0,735	1,068	1,394	1,428	1,572	1,263	1,09
cc [-]:	-0,907	-0,996	-0,999	-0,997	-0,997	-0,999	-0,997	-0,997
T30 [s]:	0,01	0,686	1,02	1,358	1,485	1,606	1,401	1,179
cc [-]:	-0,907	-0,99	-0,999	-0,999	-0,999	-1	-0,997	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>24	27	>45	>50	>48	>47	>56
G [dB]:	-30,43	-20	-5,43	2,46	2,77	0,61	3,86

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	603,7	107,1	105,1	104	93,7	89,5	76,5
C80 [dB]:	-0,29	2,54	-0,62	-0,94	0,47	1,24	3,49
D50 [-]:	0,53	0,41	0,21	0,34	0,36	0,43	0,45

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	3,21	12,27	9,67	6,3	3,95	2,88	5,67
ST late [dB]:	3,24	10,1	7,52	5,97	2,94	1,97	2,4
ST total [dB]:	-1,74	11,11	11,35	9,24	6,52	5,44	7,34

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	32	39	37	37	45	46
EDT [s]:	0,83	1,07	1,22	1,09	1,18	0,93	0,96
D50:	0,41	0,21	0,34	0,36	0,43	0,45	0,51
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,54	(Fair)
% ALC	9	
STI	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	
STIPA female	0,52	(Fair)
% ALC	10,2	
RASTI	0,49	(Fair)
% ALC	11,8	

STI male	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	

STIPA male	0,53	(Fair)
% ALC	9,8	
STITEL	0,54	(Fair)
% ALC	8,9	

**POSICIÓN 17**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,617	0,708	0,963	1,039	0,955	1,037	1,267	1,415
CC [-]:	-0,941	-0,991	-0,973	-0,994	-0,96	-0,963	-0,96	-0,982
T10 [s]:	0,014	0,905	0,81	1,038	1,487	1,199	1,245	1,133
CC [-]:	-0,975	-0,988	-0,994	-0,997	-0,996	-0,999	-1	-0,997
T20 [s]:	0,01	0,936	0,923	0,857	1,621	1,418	0,998	0,937
CC [-]:	-0,954	-0,98	-0,997	-0,996	-0,995	-0,999	-1	-0,997
T30 [s]:	0,009	0,748	0,903	0,797	0,973	1,283	0,915	0,879
CC [-]:	-0,921	-0,974	-0,996	-0,991	-0,981	-0,991	-0,99	-0,985

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	11	25	27	26	25	26	26
G [dB]:	-166,3	-156,9	-146,8	-136,1	-133,4	-129,6	-134

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2234,4	646,6	501,9	476,3	456,3	477,3	462,3
C80 [dB]:	-8,9	1,58	0,93	2,59	4,2	3,98	4,19
D50 [-]:	0,16	0,48	0,51	0,59	0,68	0,67	0,69

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	5,51	7,15	-0,93	-1,29	-3,11	-4,53	-6,46
ST late [dB]:	12,82	5,29	-0,12	-1,3	-2,62	-2,84	-3,53
ST total [dB]	12,74	9,13	2,36	1,73	0,15	-0,59	-1,75

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	7	7	7	7	5
EDT [s]:	0,71	0,96	1,04	0,95	1,04	1,27	1,41
D50 :	0,48	0,51	0,59	0,68	0,67	0,69	0,59
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	
STI	0,56	(Fair)
% ALC	8,1	
STIPA female	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	
RASTI	0,57	(Fair)
% ALC	7,6	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

STIPA male	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	
STITEL	0,57	(Fair)
% ALC	7,7	

**POSICIÓN 17**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,873	0,983	1,349	1,44	1,242	1,137	0,963
CC [-]:	0	-0,986	-0,989	-1	-1	-0,995	-0,992	-0,985
T10 [s]:	-	0,796	0,906	1,316	1,45	1,442	1,322	0,917
CC [-]:	0	-0,982	-0,994	-1	-1	-0,997	-0,994	-0,995
T20 [s]:	-	0,553	1,054	1,436	1,545	1,6	1,495	1,09
CC [-]:	0	-0,985	-0,991	-1	-1	-0,999	-0,998	-0,997
T30 [s]:	-	0,517	1,082	1,407	1,502	1,64	1,548	1,183
CC [-]:	0	-0,981	-0,996	-1	-1	-0,999	-0,999	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>18	25	>45	>51	>49	>51	>59
G [dB]:	-30,87	-22,3	-5,88	0,98	1,05	0,4	1,91

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	555,3	121	93	103,5	105,8	101,2	101,1
C80 [dB]:	0,12	1,3	1,51	0,66	0,12	-0,19	-0,59
D50 [-]:	0,51	0,38	0,24	0,41	0,4	0,33	0,32

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,19	5,72	8,47	5,04	3,51	3,78	6,26
ST late [dB]:	-2,1	3,1	5,59	4,44	3,47	3,16	5,51
ST total [dB]:	-1,49	6,91	10,31	7,77	6,49	6,49	8,91

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	32	40	38	40	48	44
EDT [s]:	0,87	0,98	1,35	1,44	1,24	1,14	0,96
D50 :	0,38	0,24	0,41	0,4	0,33	0,32	0,42
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,52	(Fair)
% ALC	10,5	
STI	0,53	(Fair)
% ALC	9,8	
STIPA female	0,51	(Fair)
% ALC	10,8	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,8	

STI male	0,51	(Fair)
% ALC	10,5	

STIPA male	0,51	(Fair)
% ALC	10,7	
STITEL	0,5	(Fair)
% ALC	11,2	



**POSICIÓN 18****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,203	1,066	0,932	0,829	0,925	0,848	0,343	0,457
CC [-]:	-0,977	-0,96	-0,99	-0,982	-0,98	-0,955	-0,984	-0,967
T10 [s]:	0,06	0,339	0,738	1,068	1,14	1,268	1,335	1,577
CC [-]:	-0,835	-0,995	-0,993	-0,997	-1	-0,989	-0,976	-0,987
T20 [s]:	0,032	0,753	1,043	1,194	1,025	1,338	1,158	1,113
CC [-]:	-0,816	-0,949	-0,995	-0,998	-1	-0,997	-0,995	-0,998
T30 [s]:	0,028	0,705	0,84	1,096	0,995	1,364	1,226	0,747
CC [-]:	-0,798	-0,936	-0,989	-0,99	-1	-0,998	-0,996	-0,978

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	12	26	27	26	27	25	26
G [dB]:	-165,1	-157,3	-146,8	-135,6	-132	-126,7	-130,2

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2843,1	647,9	472	453,7	440,5	445,2	419,8
C80 [dB]:	-9,79	-0,22	2,45	4,23	4,29	4,88	5,8
D50 [-]:	0,09	0,41	0,52	0,64	0,67	0,72	0,77

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	-1,12	6,03	-1,23	-2,55	-3,18	-6,05	-6,52
ST late [dB]:	5,36	6,04	-1,29	-2,08	-2,53	-3,34	-4,48
ST total [dB]	6,23	9,07	1,74	0,7	0,17	-1,48	-2,37

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	7	8	7	7	7
EDT [s]:	1,07	0,93	0,83	0,93	0,85	0,34	0,46
D50 :	0,41	0,52	0,64	0,67	0,72	0,77	0,74
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,1	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	7	
STIPA female	0,62	(Good)
% ALC	6	
RASTI	0,61	(Good)
% ALC	6,4	

STI male	0,61	(Good)
% ALC	6,4	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
STITEL	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	

**POSICIÓN 18**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,722	1,327	1,267	1,33	1,391	1,298	0,962
CC [-]:	0	-0,974	-0,992	-0,995	-1	-0,988	-0,995	-1
T10 [s]:	-	1,128	1,224	1,44	1,43	1,338	1,283	0,98
CC [-]:	0	-0,987	-0,996	-0,994	-1	-0,994	-0,996	-1
T20 [s]:	-	0,422	1,116	1,343	1,47	1,576	1,483	1,027
CC [-]:	0	-0,982	-0,996	-0,999	-1	-0,998	-0,998	-1
T30 [s]:	-	0,343	1,033	1,328	1,488	1,627	1,515	1,101
CC [-]:	0	-0,923	-0,998	-0,999	-1	-0,999	-0,999	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>17	20	>41	>49	>47	>46	>50
G [dB]:	-30,83	-22,58	-8,86	0,48	1,18	0,84	0,57

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	606,9	135	111	101,8	86,2	120,7	105,8
C80 [dB]:	-0,34	3,95	-0,43	0,21	2,17	-1,18	-0,07
D50 [-]:	0,54	0,34	0,29	0,39	0,53	0,28	0,36

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,77	8,04	3,8	6,86	4,16	7,76	7,97
ST late [dB]:	-1,71	3,63	4,66	5,56	3,2	8,92	7,65
ST total [dB]:	-0,61	9,43	7,21	9,31	6,71	11,37	10,81

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	7	28	37	36	35	39	42
EDT [s]:	0,72	1,33	1,27	1,33	1,39	1,3	0,96
D50 :	0,34	0,29	0,39	0,53	0,28	0,36	0,57
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,52	(Fair)
% ALC	10,2	
STI	0,52	(Fair)
% ALC	9,9	
STIPA female	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	
RASTI	0,48	(Fair)
% ALC	12,9	

STI male	0,52	(Fair)
% ALC	10	

STIPA male	0,54	(Fair)
% ALC	9	
STITEL	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	

**POSICIÓN 19**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,491	0,964	0,934	1,188	1,364	1,009	0,517	0,472
CC [-]:	-0,954	-0,992	-0,991	-0,987	-0,98	-0,95	-0,971	-0,96
T10 [s]:	0,01	1,084	1,192	1,158	1,493	1,827	1,317	0,448
CC [-]:	-0,972	-0,977	-0,991	-0,995	-0,99	-0,99	-0,963	-0,98
T20 [s]:	0,007	0,734	0,817	1,137	1,177	1,2	1,141	0,478
CC [-]:	-0,933	-0,986	-0,992	-0,998	-1	-1	-0,993	-0,99
T30 [s]:	0,006	0,632	0,698	1,345	1,219	0,903	1,632	0,905
CC [-]:	-0,889	-0,971	-0,983	-0,99	-1	-0,97	-0,978	-0,99

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	14	27	27	26	26	26	26
G [dB]:	-165,75	-154,1	-144,4	-136,1	-134	-126	-128,6

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2342,1	651,9	480,2	510,4	507	464,8	442,9
C80 [dB]:	-6,24	0,35	2,31	2,18	2,25	4,44	5,69
D50 [-]:	0,15	0,47	0,57	0,52	0,57	0,7	0,77

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	-4,32	8,31	0,75	2,28	0,37	-3,33	-7,11
ST late [dB]:	6,53	6,96	-0,48	1,67	0,5	-2,76	-5,03
ST total [dB]	6,52	10,6	3,12	5,02	3,45	-0,03	-2,94

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	7	7	7	7	6
EDT [s]:	0,96	0,93	1,19	1,36	1,01	0,52	0,47
D50 :	0,47	0,57	0,52	0,57	0,7	0,77	0,76
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	7	
STI	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	
STIPA female	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	
RASTI	0,56	(Fair)
% ALC	8	

STI male	0,58	(Good)
% ALC	7,3	

STIPA male	0,59	(Good)
% ALC	7,1	
STITEL	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	

**POSICIÓN 19**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	1,015	1,138	1,353	1,469	1,617	1,44	1,182
CC [-]:	0	-0,966	-0,98	-0,991	-0,99	-0,993	-0,99	-0,998
T10 [s]:	-	0,789	1,081	1,235	1,441	1,401	1,25	0,945
CC [-]:	0	-0,982	-0,981	-0,996	-0,99	-0,998	-0,998	-0,997
T20 [s]:	-	0,393	0,899	1,243	1,521	1,579	1,469	1,045
CC [-]:	0	-0,984	-0,995	-0,998	-1	-0,998	-0,997	-0,999
T30 [s]:	-	0,375	1,014	1,311	1,516	1,682	1,54	1,099
CC [-]:	0	-0,961	-0,995	-0,999	-1	-0,999	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>17	24	>45	>49	>46	>51	>56
G [dB]:	-30,78	-22,33	-6,75	-0,38	-1,36	1,92	1,28

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	599,6	130,3	106,7	117	101,6	136,2	120,4
C80 [dB]:	-0,01	0,87	-0,64	-1	0,98	-1,87	-1,01
D50 [-]:	0,42	0,36	0,29	0,26	0,45	0,26	0,28

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,94	7,53	7,1	6,68	3,45	9,24	6,1
ST late [dB]:	-0,39	5,88	7,26	6,99	3,54	10,74	7,32
ST total [dB]:	-0,47	9,28	10,21	9,85	6,5	13,07	9,76

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	10	32	37	35	40	45	42
EDT [s]:	1,02	1,14	1,35	1,47	1,62	1,44	1,18
D50 :	0,36	0,29	0,26	0,45	0,26	0,28	0,45
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,49	(Fair)
% ALC	12,3	
STI	0,49	(Fair)
% ALC	11,7	
STIPA female	0,49	(Fair)
% ALC	11,7	
RASTI	0,45	(Fair)
% ALC	14,6	

STI male	0,49	(Fair)
% ALC	12,1	

STIPA male	0,5	(Fair)
% ALC	11,5	
STITEL	0,48	(Fair)
% ALC	12,3	

**POSICIÓN 20**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,102	0,963	0,915	1,106	0,919	0,555	0,294	0,313
CC [-]:	-0,96	-0,982	-0,992	-0,979	-0,95	-0,92	-0,975	-0,94
T10 [s]:	0,186	1,028	0,981	1,334	1,495	1,363	0,807	0,606
CC [-]:	-0,865	-0,989	-0,99	-0,999	-1	-0,99	-0,939	-0,94
T20 [s]:	0,161	0,868	0,913	1,213	1,591	1,231	0,968	0,915
CC [-]:	-0,854	-0,99	-0,987	-0,998	-0,99	-1	-0,991	-0,99
T30 [s]:	0,156	0,577	0,881	1,135	0,944	1,196	0,63	1,154
CC [-]:	-0,833	-0,966	-0,99	-0,993	-0,98	-1	-0,965	-0,98

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	14	25	26	25	24	25	26
G [dB]:	-165,65	-158,1	-147,2	-135,6	-132	-125	-128,31

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2392,3	773,5	487	494,8	494,4	469,3	468
C80 [dB]:	-6,95	0,44	3,05	3,26	4,12	5,08	5,72
D50 [-]:	0,2	0,48	0,58	0,63	0,68	0,74	0,77

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]	-2,04	5,82	-1,94	-2,9	-5,22	-8,86	-7,55
ST late [dB]:	6,85	5,41	-1,78	-1,62	-2,65	-4,46	-4,52
ST total [dB]	7,34	8,62	1,11	0,79	-0,73	-3,11	-2,76

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	4	6	6	7	7	6	6
EDT [s]:	0,96	0,92	1,11	0,92	0,55	0,29	0,31
D50 :	0,48	0,58	0,63	0,68	0,74	0,77	0,75
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,62	(Fair)
% ALC	6	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STIPA female	0,62	(Fair)
% ALC	5,8	
RASTI	0,61	(Fair)
% ALC	6,3	

STI male	0,61	(Good)
% ALC	6,2	

STIPA male	0,62	(Good)
% ALC	6	
STITEL	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	

<b>POSICIÓN 20</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,722	1,327	1,267	1,33	1,391	1,298	0,962
CC [-]:	0	-0,974	-0,992	-0,995	-0,996	-0,988	-1	-1
T10 [s]:	-	1,128	1,224	1,44	1,43	1,338	1,283	0,98
CC [-]:	0	-0,987	-0,996	-0,994	-0,997	-0,994	-1	-1
T20 [s]:	-	0,422	1,116	1,343	1,47	1,576	1,483	1,027
CC [-]:	0	-0,982	-0,996	-0,999	-0,999	-0,998	-1	-1
T30 [s]:	-	0,343	1,033	1,328	1,488	1,627	1,515	1,101
CC [-]:	0	-0,923	-0,998	-0,999	-1	-0,999	-1	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>17	20	>41	>49	>47	>46	>50
G [dB]:	-30,8	-22,58	-8,86	0,48	1,18	0,84	0,57

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	606,9	135	111	101,8	86,2	120,7	105,8
C80 [dB]:	-0,34	3,95	-0,43	0,21	2,17	-1,18	-0,07
D50 [-]:	0,54	0,34	0,29	0,39	0,53	0,28	0,36

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,77	8,04	3,8	6,86	4,16	7,76	7,97
ST late [dB]:	-1,71	3,63	4,66	5,56	3,2	8,92	7,65
ST total [dB]:	-0,61	9,43	7,21	9,31	6,71	11,37	10,81

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	7	28	37	36	35	39	42
EDT [s]:	0,72	1,33	1,27	1,33	1,39	1,3	0,96
D50 :	0,34	0,29	0,39	0,53	0,28	0,36	0,57
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,52	(Fair)
% ALC	10,2	
STI	0,52	(Fair)
% ALC	9,9	
STIPA female	0,54	(Fair)
% ALC	9,2	
RASTI	0,48	(Fair)
% ALC	12,9	

STI male	0,52	(Fair)
% ALC	10	

STIPA male	0,54	(Fair)
% ALC	9	
STITEL	0,55	(Fair)
% ALC	8,8	

**POSICIÓN 21****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,716	0,936	0,94	1,051	1,248	0,614	0,77
CC [-]:	0	-0,995	-0,983	-0,97	-0,984	-0,936	-0,912	-0,952
T10 [s]:	-	0,852	0,809	1,127	1,217	1,283	1,083	0,897
CC [-]:	0	-0,991	-0,989	-0,997	-0,997	-0,995	-0,997	-0,998
T20 [s]:	-	0,809	0,762	1,13	1,332	1,522	0,817	0,807
CC [-]:	0	-0,988	-0,993	-0,998	-0,999	-0,997	-0,996	-0,997
T30 [s]:	-	0,704	1,247	1,046	0,96	1,039	0,733	1,579
CC [-]:	0	-0,947	-0,991	-0,99	-0,966	-0,982	-0,979	-0,988

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	26	28	26	25	25	26
G [dB]:	-167,3	-157,41	-146,4	-134,9	-133,73	-128,15	-131,48

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2267,5	621,1	481,4	462,5	470,9	459,2	451,2
C80 [dB]:	-5,05	1,66	2,56	3,64	3,79	4,74	5,2
D50 [-]:	0,3	0,5	0,54	0,66	0,62	0,72	0,74

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-5,25	5,96	-2,15	-3,86	-3,27	-7,31	-7,79
ST late [dB]:	2,61	4,31	-0,61	-2,76	-2,16	-4,03	-4,69
ST total [dB]:	2,5	8,09	1,65	-0,26	0,33	-2,36	-2,96

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NR [dB]:	5	7	7	7	7	7	6
EDT [s]:	0,72	0,94	0,94	1,05	1,25	0,61	0,77
D50 :	0,5	0,54	0,66	0,62	0,72	0,74	0,7
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,4	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	
STIPA female	0,61	(Good)
% ALC	6,4	
RASTI	0,61	(Good)
% ALC	6,3	

STI male	0,6	(Good)
% ALC	6,6	

STIPA male	0,6	(Good)
% ALC	6,6	
STITEL	0,59	(Fair)
% ALC	7	

<b>POSICIÓN 21</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,873	0,983	1,349	1,44	1,242	1,137	0,963
CC [-]:	0	-0,986	-0,99	-0,995	-0,998	-0,995	-0,992	-0,985
T10 [s]:	-	0,796	0,906	1,316	1,45	1,442	1,322	0,917
CC [-]:	0	-0,982	-0,99	-0,996	-0,999	-0,997	-0,994	-0,995
T20 [s]:	-	0,553	1,054	1,436	1,545	1,6	1,495	1,09
CC [-]:	0	-0,985	-0,99	-0,998	-1	-0,999	-0,998	-0,997
T30 [s]:	-	0,517	1,082	1,407	1,502	1,64	1,548	1,183
CC [-]:	0	-0,981	-1	-0,999	-1	-0,999	-0,999	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>18	25	>45	>51	>49	>51	>59
G [dB]:	-30,87	-22,3	-5,88	0,98	1,05	0,4	1,91

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	555,3	121	93	103,5	105,8	101,2	101,1
C80 [dB]:	0,12	1,3	1,51	0,66	0,12	-0,19	-0,59
D50 [-]:	0,51	0,38	0,24	0,41	0,4	0,33	0,32

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,19	5,72	8,47	5,04	3,51	3,78	6,26
ST late [dB]:	-2,1	3,1	5,59	4,44	3,47	3,16	5,51
ST total [dB]:	-1,49	6,91	10,31	7,77	6,49	6,49	8,91

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	12	32	40	38	40	48	44
EDT [s]:	0,87	0,98	1,35	1,44	1,24	1,14	0,96
D50:	0,38	0,24	0,41	0,4	0,33	0,32	0,42
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,52	(Fair)
% ALC	10,5	
STI	0,53	(Fair)
% ALC	9,8	
STIPA female	0,51	(Fair)
% ALC	10,8	
RASTI	0,51	(Fair)
% ALC	10,8	

STI male	0,51	(Fair)
% ALC	10,5	

STIPA male	0,51	(Fair)
% ALC	10,7	
STITEL	0,5	(Fair)
% ALC	11,2	



**POSICIÓN 22****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	9,554	0,65	0,91	1,034	0,928	0,794	0,84	1,013
CC [-]:	-0,984	-0,98	-0,989	-0,979	-0,979	-0,96	-0,973	-0,952
T10 [s]:	11,982	0,661	1,09	1,132	1,222	1,483	1,002	0,833
CC [-]:	-0,916	-0,989	-0,997	-0,996	-0,998	-0,992	-0,993	-0,991
T20 [s]:	9,931	0,517	1,071	1,167	1,342	1,654	0,794	0,705
CC [-]:	-0,904	-0,984	-0,997	-0,998	-0,998	-0,998	-0,997	-0,992
T30 [s]:	9,7	0,467	1,187	1,109	1,212	1,619	1,792	1,552
CC [-]:	-0,888	-0,972	-0,995	-0,992	-0,994	-0,997	-0,984	-0,985

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>12	27	26	26	26	24	27
G [dB]:	-166,3	-156,5	-147	-137,2	-134,7	-129	-133,3

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2482,7	622	514,6	472,7	463,4	449,7	468
C80 [dB]:	-13,56	2,33	2,85	3,12	3,36	4,51	4,52
D50 [-]:	0,05	0,51	0,6	0,6	0,63	0,71	0,71

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	7,86	9,28	-1,19	-1,11	0,27	-4,51	-4,14
ST late [dB]:	17,9	7,69	-1,02	-0,93	-0,85	-3,5	-3,7
ST total [dB]:	17,95	11,45	1,92	1,99	2,75	-0,96	-0,9

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	6	6	7	7	7	7	5
EDT [s]:	0,65	0,91	1,03	0,93	0,79	0,84	1,01
D50:	0,51	0,6	0,6	0,63	0,71	0,71	0,69
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	
STI	0,57	(Fair)
% ALC	7,7	
STIPA female	0,,59	(Fair)
% ALC	7,1	
RASTI	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

STIPA male	0,58	(Fair)
% ALC	7,3	
STITEL	0,57	(Fair)
% ALC	7,6	

<b>POSICIÓN 22</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	1,033	1,238	1,414	1,483	1,484	1,401	1,122
cc [-]:	0	-0,99	-0,986	-0,995	-0,997	-0,997	-0,996	-0,996
T10 [s]:	-	0,773	1,125	1,202	1,493	1,614	1,534	1,099
cc [-]:	0	-0,978	-0,995	-0,997	-0,998	-0,997	-0,995	-0,998
T20 [s]:	-	0,661	1,087	1,333	1,535	1,747	1,64	1,208
cc [-]:	0	-0,988	-0,999	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999
T30 [s]:	-	0,541	1,148	1,348	1,522	1,76	1,634	1,277
cc [-]:	0	-0,971	-0,999	-0,999	-1	-1	-1	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>16	23	>41	>49	>48	>50	>60
G [dB]:	-30,26	-25,02	-8,85	-0,51	0,26	-0,07	2,61

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	566,4	171,4	121,1	116,7	103,1	120,3	103,2
C80 [dB]:	-0,51	-0,08	-2,39	-1,44	0,58	-1,53	0,38
D50 [-]:	0,44	0,38	0,21	0,3	0,41	0,34	0,44

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,07	8,07	9,7	6,27	3,81	5,93	3,86
ST late [dB]:	0,45	6,43	10,84	6,73	2,67	6,06	3,29
ST total [dB]:	0,02	8,79	13,35	9,52	6,28	9,01	6,6

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	7	28	37	38	39	50	45
EDT [s]:	1,03	1,24	1,41	1,48	1,48	1,4	1,12
D50 :	0,38	0,21	0,3	0,41	0,34	0,44	0,6
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,51	(Fair)
% ALC	11	
STI	0,51	(Fair)
% ALC	10,8	
STIPA female	0,5	(Fair)
% ALC	11,6	
RASTI	0,47	(Fair)
% ALC	13,7	

STI male	0,5	(Fair)
% ALC	11,2	

STIPA male	0.49	(Fair)
% ALC	11.7	
STITEL	0,51	(Fair)
% ALC	11	

**POSICIÓN 23****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,125	0,744	0,969	1,087	1,054	0,586	0,483	0,369
CC [-]:	-0,878	-0,995	-0,989	-0,992	-0,969	-0,963	-0,941	-0,958
T10 [s]:	0,053	0,517	1,41	0,981	1,507	1,3	1,218	1,184
CC [-]:	-0,746	-0,989	-0,998	-0,992	-0,997	-0,983	-0,985	-0,972
T20 [s]:	0,042	0,667	1,085	1,201	1,129	1,428	1,257	1,152
CC [-]:	-0,767	-0,972	-0,994	-0,997	-0,99	-0,995	-0,998	-0,997
T30 [s]:	0,04	0,632	1,046	1,146	1,017	1,55	1,265	1,359
CC [-]:	-0,756	-0,954	-0,991	-0,986	-0,98	-0,995	-0,997	-0,993

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	11	26	25	25	24	25	25
G [dB]:	-166	-158,44	-147,2	-137,7	-135,11	-127,4	-131,3

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2459,2	697,4	522,8	534,3	515,6	487,2	467,8
C80 [dB]:	-10,08	1,97	2,48	1,87	3,26	4,59	5,12
D50 [-]:	0,08	0,49	0,56	0,53	0,61	0,72	0,74

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	4,77	6,87	1,45	-1,05	-0,9	-5,38	-7,76
ST late [dB]:	9,71	4,65	1,19	0,41	-0,55	-3,07	-4,24
ST total [dB]:	10,92	8,96	4,3	2,75	2,3	-1,06	-2,65

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	6	7	6	7	6
EDT [s]:	0,74	0,97	1,09	1,05	0,59	0,48	0,37
D50 :	0,49	0,56	0,53	0,61	0,72	0,74	0,74
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,6 (Fair)
% ALC	6,7
STI	0,58 (Fair)
% ALC	7,4
STIPA female	0,6 (Good)
% ALC	6,5
RASTI	0,58 (Fair)
% ALC	7,5

STI male	0,59 (Fair)
% ALC	7

STIPA male	0,59 (Fair)
% ALC	6,8
STITEL	0,58 (Fair)
% ALC	7,3

**POSICIÓN 23**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	96,46	1,339	1,36	1,577	1,503	1,566	1,392	1,301
cc [-]:	-0,634	-0,995	-0,988	-0,995	-0,998	-0,993	-0,997	-0,999
T10 [s]:	0,004	1,123	1,15	1,279	1,544	1,508	1,245	1,072
cc [-]:	-0,966	-0,994	-0,995	-0,996	-0,998	-0,996	-0,998	-0,994
T20 [s]:	0,004	1,392	1,161	1,336	1,532	1,648	1,452	1,151
cc [-]:	-0,924	-0,975	-0,998	-0,999	-1	-0,999	-0,998	-0,998
T30 [s]:	0,004	0,623	1,256	1,324	1,555	1,681	1,519	1,226
cc [-]:	-0,924	-0,95	-0,999	-0,999	-1	-0,999	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>19	>30	>43	>48	>46	>43	>50
G [dB]:	-30,01	-25,08	-8,18	0,43	1,48	0,49	1,98

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	665,2	183,1	110,7	126,9	97,1	121,8	103,6
C80 [dB]:	-0,72	1,46	-1,08	-2,11	1,24	-1,66	0,07
D50 [-]:	0,47	0,37	0,36	0,28	0,44	0,31	0,36

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,62	7,59	4,97	6,37	1,89	4,51	6,12
ST late [dB]:	-0,4	5,91	5,8	7,52	2,12	6,3	5,53
ST total [dB]:	-0,08	8,17	8,44	9,99	5,04	8,52	8,83

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	17	31	37	35	33	39	43
EDT [s]:	1,34	1,36	1,58	1,5	1,57	1,39	1,3
D50 :	0,37	0,36	0,28	0,44	0,31	0,36	0,49
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,5 (Fair)
% ALC	11,4
STI	0,49 (Fair)
% ALC	11,7
STIPA female	0,49 (Fair)
% ALC	12,1
RASTI	0,47 (Fair)
% ALC	13,4

STI male	0,5 (Fair)
% ALC	11,6

STIPA male	0,49 (Fair)
% ALC	12
STITEL	0,49 (Fair)
% ALC	12,1

**POSICIÓN 24****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,708	0,926	1,125	1,083	1,258	0,445	0,31	0,352
cc [-]:	-0,974	-0,988	-0,992	-0,991	-0,972	-0,961	-0,983	-0,97
T10 [s]:	0,034	0,88	0,955	1,102	1,468	1,661	1,323	0,682
cc [-]:	-0,867	-0,986	-0,986	-0,995	-0,998	-0,982	-0,965	-0,961
T20 [s]:	0,022	0,663	0,793	1,13	1,394	1,504	1,198	0,935
cc [-]:	-0,781	-0,99	-0,995	-0,997	-0,998	-0,993	-0,995	-0,992
T30 [s]:	0,02	0,636	0,876	1,026	1,365	0,815	1,316	0,867
cc [-]:	-0,749	-0,983	-0,992	-0,992	-0,998	-0,962	-0,996	-0,991

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	10	26	26	25	25	24	25
G [dB]:	-166,6	-154,8	-145,88	-136,37	-134,67	-126,41	-130,03

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2428,5	639	595,9	532,6	529	499	479,9
C80 [dB]:	-8,68	0,76	1,7	2,06	2,6	4,78	5,27
D50 [-]:	0,2	0,42	0,51	0,52	0,59	0,73	0,76

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-7,41	6,9	0,67	2,68	0,48	-6,32	-7,39
ST late [dB]:	4,74	7,15	1,32	2,13	0,62	-3,62	-4,44
ST total [dB]:	4,97	9,98	4,03	5,44	3,55	-1,75	-2,66

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	5	6	6	6	6	6
EDT [s]:	0,93	1,12	1,08	1,26	0,45	0,31	0,35
D50 :	0,42	0,51	0,52	0,59	0,73	0,76	0,75
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STI	0,57	(Fair)
% ALC	7,6	
STIPA female	0,6	(Good)
% ALC	6,6	
RASTI	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,2	

STIPA male	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STITEL	0,58	(Fair)
% ALC	7,2	

**POSICIÓN 24****IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	1,281	0,994	1,126	1,603	1,462	1,515	1,341	1,128
CC [-]:	-0,951	-0,989	-0,99	-0,992	-0,996	-0,992	-0,995	-0,998
T10 [s]:	-	0,794	1,131	1,301	1,38	1,509	1,284	0,945
CC [-]:	0	-0,996	-0,992	-0,997	-0,998	-0,995	-0,997	-0,996
T20 [s]:	-	0,713	1,186	1,374	1,446	1,598	1,378	1,08
CC [-]:	0	-0,984	-0,996	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998
T30 [s]:	-	0,673	1,228	1,386	1,499	1,636	1,454	1,166
CC [-]:	0	-0,979	-0,998	-1	-0,999	-1	-0,999	-0,998

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>13	23	>44	>48	>47	>45	>50
G [dB]:	-30,5	-22,85	-8	-1,02	0,32	-1,76	1,18

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	621,1	146,6	114,9	128,7	119,4	110,4	101,2
C80 [dB]:	-0,05	-0,88	-2,04	-1,38	-0,84	0,22	0,7
D50 [-]:	0,45	0,36	0,23	0,27	0,29	0,39	0,37

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-1,73	7,28	12,23	5,84	5,95	4,32	4,95
ST late [dB]:	-1,04	4,44	12,41	7,26	6,85	5,23	4,6
ST total [dB]:	-0,44	8,89	15,28	9,63	9,43	7,81	7,79

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	9	32	37	36	34	39	44
EDT [s]:	0,99	1,13	1,6	1,46	1,52	1,34	1,13
D50 :	0,36	0,23	0,27	0,29	0,39	0,37	0,45
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,5	(Fair)
% ALC	11,3	
STI	0,5	(Fair)
% ALC	11,1	
STIPA female	0,5	(Fair)
% ALC	11,1	
RASTI	0,46	(Fair)
% ALC	14,2	

STI male	0,5	(Fair)
% ALC	11,6	

STIPA male	0,51	(Fair)
% ALC	11,1	
STITEL	0,53	(Fair)
% ALC	9,7	

**POSICIÓN 25****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,965	0,555	0,836	1,069	1,15	0,402	0,321	0,306
CC [-]:	-0,987	-0,989	-0,992	-0,982	-0,966	-0,965	-0,975	-0,933
T10 [s]:	0,009	0,429	1,013	1,302	1,37	1,418	1,566	0,564
CC [-]:	-0,977	-0,966	-0,995	-0,996	-0,996	-0,974	-0,959	-0,941
T20 [s]:	0,007	0,373	0,874	1,359	1,3	1,459	1,179	1,001
CC [-]:	-0,93	-0,99	-0,993	-0,996	-0,998	-0,996	-0,994	-0,987
T30 [s]:	0,006	0,362	0,848	0,972	1,469	1,582	1,393	1,036
CC [-]:	-0,911	-0,985	-0,993	-0,987	-0,98	-0,997	-0,992	-0,99

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	11	26	26	26	26	25	26
G [dB]:	-164,8	-158,2	-147,1	-137,1	-134,5	-126,1	-129,5

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2846,5	777	499,4	465,9	464,1	460,5	443,5
C80 [dB]:	-11,46	2,29	3,2	3,18	3,41	5,23	5,92
D50 [-]:	0,1	0,48	0,58	0,6	0,64	0,75	0,78

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-2,39	5,83	0,99	0,25	-0,89	-5,71	-7,02
ST late [dB]:	9,18	4,74	0,48	-0,06	-0,85	-3,6	-4,52
ST total [dB]:	9,26	8,12	3,72	3,11	2,15	-1,52	-2,58

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	4	7	7	7	7	7	6
EDT [s]:	0,55	0,84	1,07	1,15	0,4	0,32	0,31
D50 :	0,48	0,58	0,6	0,64	0,75	0,78	0,77
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,1	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	
STIPA female	0,62	(Good)
% ALC	5,9	
RASTI	0,6	(Fair)
% ALC	6,7	

STI male	0,61	(Good)
% ALC	6,4	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,2	
STITEL	0,59	(Fair)
% ALC	6,8	

**POSICIÓN 25**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	96,46	1,339	1,36	1,577	1,503	1,566	1,392	1,301
cc [-]:	-0,634	-0,995	-0,988	-0,995	-0,998	-0,993	-0,997	-0,999
T10 [s]:	0,004	1,123	1,15	1,279	1,544	1,508	1,245	1,072
cc [-]:	-0,966	-0,994	-0,995	-0,996	-0,998	-0,996	-0,998	-0,994
T20 [s]:	0,004	1,392	1,161	1,336	1,532	1,648	1,452	1,151
cc [-]:	-0,924	-0,975	-0,998	-0,999	-1	-0,999	-0,998	-0,998
T30 [s]:	0,004	0,623	1,256	1,324	1,555	1,681	1,519	1,226
cc [-]:	-0,924	-0,95	-0,999	-0,999	-1	-0,999	-0,999	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>19	>30	>43	>48	>46	>43	>50
G [dB]:	-30,01	-25,08	-8,18	0,43	1,48	0,49	1,98

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	665,2	183,1	110,7	126,9	97,1	121,8	103,6
C80 [dB]:	-0,72	1,46	-1,08	-2,11	1,24	-1,66	0,07
D50 [-]:	0,47	0,37	0,36	0,28	0,44	0,31	0,36

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,62	7,59	4,97	6,37	1,89	4,51	6,12
ST late [dB]:	-0,4	5,91	5,8	7,52	2,12	6,3	5,53
ST total [dB]:	-0,08	8,17	8,44	9,99	5,04	8,52	8,83

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	17	31	37	35	33	39	43
EDT [s]:	1,34	1,36	1,58	1,5	1,57	1,39	1,3
D50:	0,37	0,36	0,28	0,44	0,31	0,36	0,49
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,5 (Fair)
% ALC	11,4
STI	0,49 (Fair)
% ALC	11,7
STIPA female	0,49 (Fair)
% ALC	12,1
RASTI	0,47 (Fair)
% ALC	13,4

STI male	0,5 (Fair)
% ALC	11,6

STIPA male	0,49 (Fair)
% ALC	12
STITEL	0,49 (Fair)
% ALC	12,1



**POSICIÓN 26**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,564	0,795	0,722	1,081	1,146	0,386	0,445	0,32
cc [-]:	-0,939	-0,96	-0,982	-0,976	-0,941	-0,9	-0,897	-0,854
T10 [s]:	0,085	0,905	1,317	1,364	1,559	0,619	0,645	0,626
cc [-]:	-0,921	-0,989	-0,993	-0,997	-0,998	-0,987	-0,982	-0,976
T20 [s]:	0,074	0,64	1,292	1,373	1,21	0,667	0,65	0,901
cc [-]:	-0,932	-0,989	-0,994	-0,999	-0,993	-0,993	-0,992	-0,995
T30 [s]:	0,071	0,605	1,222	1,07	1,083	1,123	0,59	0,854
cc [-]:	-0,889	-0,983	-0,995	-0,983	-0,977	-0,994	-0,974	-0,992

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	15	27	25	25	24	26	28
G [dB]:	-167,6	-158,1	-147,9	-137,5	-134,6	-126,4	-130,9

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2190,4	654,7	488	504,9	500,5	460,4	468,2
C80 [dB]:	-6,1	2,22	3,87	3,12	3,54	5,5	5,59
D50 [-]:	0,16	0,55	0,57	0,6	0,66	0,76	0,76

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-3,53	6,91	-0,24	-1,51	-1,5	-6,88	-7,35
ST late [dB]:	8,58	6,22	-1,13	-1,09	-1,36	-4,91	-5,05
ST total [dB]:	8,75	9,57	2,31	1,72	1,58	-2,77	-3,03

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	7	7	7	7	5
EDT [s]:	0,8	0,72	1,08	1,15	0,39	0,44	0,32
D50 :	0,55	0,57	0,6	0,66	0,76	0,76	0,72
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,61	(Good)
% ALC	6,3	
STI	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STIPA female	0,61	(Good)
% ALC	6,1	
RASTI	0,6	(Good)
% ALC	6,5	

STI male	0,6	(Good)
% ALC	6,6	

STIPA male	0,61	(Good)
% ALC	6,3	
STITEL	0,57	(Good)
% ALC	7,7	

**POSICIÓN 26****IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	1,033	1,238	1,414	1,483	1,484	1,401	1,122
cc [-]:	0	-0,99	-0,986	-0,995	-0,997	-0,997	-0,996	-0,996
T10 [s]:	-	0,773	1,125	1,202	1,493	1,614	1,534	1,099
cc [-]:	0	-0,978	-0,995	-0,997	-0,998	-0,997	-0,995	-0,998
T20 [s]:	-	0,661	1,087	1,333	1,535	1,747	1,64	1,208
cc [-]:	0	-0,988	-0,999	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999
T30 [s]:	-	0,541	1,148	1,348	1,522	1,76	1,634	1,277
cc [-]:	0	-0,971	-0,999	-0,999	-1	-1	-1	-0,999

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>16	23	>41	>49	>48	>50	>60
G [dB]:	-30,26	-25,02	-8,85	-0,51	0,26	-0,07	2,61

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	566,4	171,4	121,1	116,7	103,1	120,3	103,2
C80 [dB]:	-0,51	-0,08	-2,39	-1,44	0,58	-1,53	0,38
D50 [-]:	0,44	0,38	0,21	0,3	0,41	0,34	0,44

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,07	8,07	9,7	6,27	3,81	5,93	3,86
ST late [dB]:	0,45	6,43	10,84	6,73	2,67	6,06	3,29
ST total [dB]:	0,02	8,79	13,35	9,52	6,28	9,01	6,6

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	7	28	37	38	39	50	45
EDT [s]:	1,03	1,24	1,41	1,48	1,48	1,4	1,12
D50:	0,38	0,21	0,3	0,41	0,34	0,44	0,6
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,51	(Fair)
% ALC	11	
STI	0,51	(Fair)
% ALC	10,8	
STIPA female	0,5	(Fair)
% ALC	11,6	
RASTI	0,47	(Fair)
% ALC	13,7	

STI male	0,5	(Fair)
% ALC	11,2	

STIPA male	0.49	(Fair)
% ALC	11.7	
STITEL	0,51	(Fair)
% ALC	11	

**POSICIÓN 27****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,734	0,886	1,208	1,143	1,285	1,391	1,277	0,931
cc [-]:	-0,985	-0,981	-0,987	-0,997	-0,998	-0,994	-0,983	-0,936
T10 [s]:	0,67	1,206	1,179	1,373	1,583	1,536	1,225	1,069
cc [-]:	-0,99	-0,988	-0,996	-0,996	-0,998	-0,997	-0,999	-0,998
T20 [s]:	0,595	0,807	1,092	1,448	1,522	1,553	1,311	1,065
cc [-]:	-0,977	-0,984	-0,999	-0,998	-0,999	-1	-0,999	-0,999
T30 [s]:	0,548	0,766	1,134	1,443	1,496	1,68	1,328	1,154
cc [-]:	-0,964	-0,991	-0,999	-0,999	-1	-0,999	-1	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	17	33	40	44	40	39	40
G [dB]:	-165,2	-146,6	-136,8	-128,57	-127,37	-125,51	-126,5

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2037,2	182,8	68,4	75,4	94,7	140,5	59
C80 [dB]:	-0,68	4,28	5,2	3,4	2,69	-1,81	5,8
D50 [-]:	0,32	0,55	0,72	0,59	0,52	0,26	0,72

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	0,87	-0,33	-4,09	-0,15	1,3	6,72	-5,2
ST late [dB]:	3,57	-2,74	-5,25	-1,79	0,06	7,51	-5,85
ST total [dB]:	5,32	1,63	-1,62	2,15	3,72	10,14	-2,5

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	13	21	27	23	22	22	20
EDT [s]:	0,89	1,21	1,14	1,29	1,39	1,28	0,93
D50 :	0,55	0,72	0,59	0,52	0,26	0,72	0,85
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	
STI	0,6	(Good)
% ALC	6,5	
STIPA female	0,57	(Fair)
% ALC	7,8	
RASTI	0,49	(Fair)
% ALC	11,7	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

STIPA male	0,57	(Fair)
% ALC	7,9	
STITEL	0,63	(Good)
% ALC	5,7	

**POSICIÓN 27****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	43,02	0,768	1,328	1,184	1,29	1,443	1,31	1,409
CC [-]:	-0,938	-0,958	-0,971	-0,998	-0,998	-0,998	-0,996	-0,982
T10 [s]:	21,313	1,108	1,5	1,345	1,213	1,46	1,172	1,22
CC [-]:	-0,917	-0,957	-0,994	-0,998	-0,998	-0,999	-0,999	-0,998
T20 [s]:	14,188	0,793	1,076	1,07	1,338	1,389	1,105	0,958
CC [-]:	-0,891	-0,981	-0,973	-0,99	-0,999	-0,999	-0,997	-0,996
T30 [s]:	14,007	0,66	0,897	1,017	1,294	1,334	2,192	1,549
CC [-]:	-0,885	-0,96	-0,979	-0,988	-0,997	-0,995	-0,987	-0,993

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>7	26	24	25	25	24	25
G [dB]:	-170,7	-152,5	-145,4	-137	-136	-133,9	-136,3

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2281,2	644,6	538,6	536,4	554,5	580,6	546,1
C80 [dB]:	-4,55	2,91	2,99	0,86	-0,21	-2,09	1,33
D50 [-]:	0,18	0,41	0,63	0,45	0,36	0,21	0,49

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-0,96	1,8	-5,22	-0,45	2,25	8,13	-2,27
ST late [dB]:	3,33	1,61	-2,22	0,99	3,18	9,44	-0,08
ST total [dB]:	2,44	4,65	-0,47	3,35	5,75	11,85	1,97

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	6	6	6	6	5
EDT [s]:	0,77	1,33	1,18	1,29	1,44	1,31	1,41
D50 :	0,41	0,63	0,45	0,36	0,21	0,49	0,56
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,47	(Fair)
% ALC	13,2	
STI	0,49	(Fair)
% ALC	12,1	
STIPA female	0,48	(Fair)
% ALC	12,7	
RASTI	0,43	(Poor)
% ALC	16,7	

STI male	0,47	(Fair)
% ALC	13,6	

STIPA male	0,47	(Fair)
% ALC	13	
STITEL	0,51	(Fair)
% ALC	11	

**POSICIÓN 27**  
**IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,062	0,696	1,246	1,413	1,172	1,092	0,926	0,7
CC [-]:	-0,963	-0,671	-0,995	-0,995	-0,993	-0,997	-0,996	-0,985
T10 [s]:	0,057	0,724	1,178	1,373	1,484	1,363	1,26	0,747
CC [-]:	-0,922	-0,955	-0,997	-0,989	-0,997	-0,995	-0,992	-0,995
T20 [s]:	0,034	0,989	1,201	1,346	1,441	1,559	1,502	1,007
CC [-]:	-0,886	-0,987	-0,997	-0,998	-0,999	-0,998	-0,997	-0,993
T30 [s]:	0,022	0,695	1,115	1,39	1,454	1,652	1,581	1,144
CC [-]:	-0,878	-0,976	-0,997	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998	-0,995

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	41	32	>43	>50	>50	>49	>55
G [dB]:	-10,33	-11,34	-5,46	3,11	4,16	4,14	5,97

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	24,3	24,3	93	97,9	79,5	72,2	65,7
C80 [dB]:	20,55	13,5	1,58	1,09	2,96	3,56	4,33
D50 [-]:	0,99	0,9	0,34	0,43	0,49	0,55	0,55

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-18,49	-8,31	2,82	3,37	1,85	1,42	1,3
ST late [dB]:	-23,17	-14,1	1,78	2,78	0,07	-0,29	-1,64
ST total [dB]:	-18,34	-7,53	5,26	6,12	4,07	3,63	3,09

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	20	31	39	39	39	44	49
EDT [s]:	0,7	1,25	1,41	1,17	1,09	0,93	0,7
D50 :	0,9	0,34	0,43	0,49	0,55	0,55	0,67
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,57	(Fair)
% ALC	7,9	
STI	0,6	(Good)
% ALC	6,6	
STIPA female	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	
RASTI	0,55	(Fair)
% ALC	8,7	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	

STIPA male	0,55	(Fair)
% ALC	8,5	
STITEL	0,57	(Fair)
% ALC	7,7	

**POSICIÓN 28****INTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,734	0,886	1,208	1,143	1,285	1,391	1,277	0,931
cc [-]:	-0,985	-0,981	-0,987	-0,997	-0,998	-0,994	-0,983	-0,936
T10 [s]:	0,67	1,206	1,179	1,373	1,583	1,536	1,225	1,069
cc [-]:	-0,99	-0,988	-0,996	-0,996	-0,998	-0,997	-0,999	-0,998
T20 [s]:	0,595	0,807	1,092	1,448	1,522	1,553	1,311	1,065
cc [-]:	-0,977	-0,984	-0,999	-0,998	-0,999	-1	-0,999	-0,999
T30 [s]:	0,548	0,766	1,134	1,443	1,496	1,68	1,328	1,154
cc [-]:	-0,964	-0,991	-0,999	-0,999	-1	-0,999	-1	-1

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	17	33	40	44	40	39	40
G [dB]:	-165,2	-146,6	-136,8	-128,6	-127,4	-125,51	-126,47

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2037,2	182,8	68,4	75,4	94,7	140,5	59
C80 [dB]:	-0,68	4,28	5,2	3,4	2,69	-1,81	5,8
D50 [-]:	0,32	0,55	0,72	0,59	0,52	0,26	0,72

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	0,87	-0,33	-4,09	-0,15	1,3	6,72	-5,2
ST late [dB]:	3,57	-2,74	-5,25	-1,79	0,06	7,51	-5,85
ST total [dB]:	5,32	1,63	-1,62	2,15	3,72	10,14	-2,5

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	13	21	27	23	22	22	20
EDT [s]:	0,89	1,21	1,14	1,29	1,39	1,28	0,93
D50 :	0,55	0,72	0,59	0,52	0,26	0,72	0,85
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	7,1	
STI	0,6	(Good)
% ALC	6,5	
STIPA female	0,57	(Fair)
% ALC	7,8	
RASTI	0,49	(Fair)
% ALC	11,7	

STI male	0,58	(Fair)
% ALC	7,5	

STIPA male	0,57	(Fair)
% ALC	7,9	
STITEL	0,63	(Good)
% ALC	5,7	

**POSICIÓN 28****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,552	0,813	1,191	1,09	1,347	1,361	1,307	1,374
cc [-]:	-0,96	-0,975	-0,985	-0,997	-0,995	-0,999	-0,997	-0,998
T10 [s]:	3,911	1,098	0,895	1,076	1,227	1,463	1,258	1,13
cc [-]:	-0,958	-0,97	-0,995	-0,998	-0,998	-0,999	-0,999	-0,998
T20 [s]:	3,789	0,846	0,991	0,899	1,202	1,386	1,379	1,043
cc [-]:	-0,968	-0,977	-0,997	-0,997	-0,999	-0,999	-0,999	-0,993
T30 [s]:	3,772	0,625	0,865	1,222	1,085	1,412	1,026	0,903
cc [-]:	-0,965	-0,951	-0,984	-0,989	-0,989	-0,999	-0,984	-0,977

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	10	26	26	25	25	24	24
G [dB]:	-169,6	-155,4	-146,5	-137,4	-137,1	-134,3	-138,6

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2663,7	627	551,3	596,9	580,3	609,2	603,7
C80 [dB]:	-9,9	2,49	0,85	0,78	-1,49	-3,23	-1,2
D50 [-]:	0,06	0,36	0,49	0,36	0,3	0,17	0,32

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-6,78	1,65	-1,25	3,63	3,19	13,39	2,61
ST late [dB]:	-1,03	1,69	1,42	4,15	4,78	14,94	4,38
ST total [dB]:	-1,71	4,55	3,31	6,9	7,08	17,25	6,58

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	6	6	6	6	6	5
EDT [s]:	0,81	1,19	1,09	1,35	1,36	1,31	1,37
D50 :	0,36	0,49	0,36	0,3	0,17	0,32	0,35
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,43	(Poor)
% ALC	16,9	
STI	0,44	(Poor)
% ALC	15,5	
STIPA female	0,44	(Poor)
% ALC	15,8	
RASTI	0,43	(Poor)
% ALC	16,5	

STI male	0,43	(Poor)
% ALC	16,8	

STIPA male	0,44	(Poor)
% ALC	15,8	
STITEL	0,46	(Fair)
% ALC	14,3	

**POSICIÓN 28****IMPULSO EXTERNO**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	0,068	0,724	1,334	1,222	1,345	1,189	1,007	0,806
cc [-]:	-0,958	-0,807	-0,978	-0,994	-0,998	-0,996	-0,994	-0,99
T10 [s]:	0,059	0,877	1,218	1,433	1,377	1,508	1,192	0,838
cc [-]:	-0,932	-0,955	-0,988	-0,996	-0,999	-0,997	-0,996	-0,996
T20 [s]:	0,035	0,933	1,168	1,369	1,473	1,684	1,414	1,095
cc [-]:	-0,892	-0,985	-0,995	-0,998	-0,999	-0,999	-0,997	-0,995
T30 [s]:	0,022	0,825	1,128	1,376	1,5	1,715	1,509	1,193
cc [-]:	-0,896	-0,965	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,998	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	49	40	>43	>51	>50	>47	>54
G [dB]:	-9,95	-12,57	-5,95	4,05	4,04	3,12	7,92

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	25,4	34	114,7	106,1	82,4	68,4	51
C80 [dB]:	21,02	11,71	-0,9	0,89	2,53	3,95	5,64
D50 [-]:	0,99	0,81	0,29	0,25	0,48	0,57	0,68

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-17,07	-4,89	4,26	11,75	0,38	-0,95	-2,43
ST late [dB]:	-23,33	-10,44	5,5	9,54	-0,64	-2,26	-4,64
ST total [dB]:	-17,15	-3,94	7,92	13,79	2,91	1,45	-0,39

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	27	30	40	39	37	43	49
EDT [s]:	0,72	1,33	1,22	1,35	1,19	1,01	0,81
D50 :	0,81	0,29	0,25	0,48	0,57	0,68	0,71
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,59	(Fair)
% ALC	6,9	
STI	0,61	(Good)
% ALC	6,4	
STIPA female	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	
RASTI	0,57	(Fair)
% ALC	7,8	

STI male	0,6	(Fair)
% ALC	6,6	

STIPA male	0,58	(Fair)
% ALC	7,4	
STITEL	0,61	(Good)
% ALC	6,1	



**POSICIÓN 29****EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	10,454	1,04	0,966	1,011	1,214	1,272	1,105	0,815
CC [-]:	-0,897	-0,962	-0,981	-0,994	-0,999	-0,999	-0,996	-0,985
T10 [s]:	0,042	1,087	0,942	1,243	1,231	1,392	1,109	0,919
CC [-]:	-0,966	-0,966	-0,986	-0,997	-0,999	-0,998	-0,999	-0,997
T20 [s]:	0,047	0,804	1,29	1,203	1,317	1,57	1,479	1,088
CC [-]:	-0,968	-0,99	-0,993	-0,997	-0,999	-0,997	-0,996	-0,999
T30 [s]:	0,039	0,788	1,282	1,139	1,281	1,591	1,905	1,057
CC [-]:	-0,933	-0,985	-0,99	-0,996	-0,997	-0,998	-0,986	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	13	26	25	25	25	25	26
G [dB]:	-170,8	-156,7	-146,2	-137,6	-136	-132,2	-136

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2177,3	672,2	516,8	555,6	584,4	567	543,1
C80 [dB]:	-5,84	2,02	2,49	1,24	0,5	0,25	2,34
D50 [-]:	0,13	0,54	0,57	0,41	0,38	0,4	0,52

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	7,38	-1,13	-2,5	2,11	4,04	1,76	-1,72
ST late [dB]:	11,71	-0,42	-1,89	2,01	4,79	2,8	-0,72
ST total [dB]:	12,99	2,22	0,81	5,06	7,45	5,32	1,82

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	6	6	6	6	5
EDT [s]:	1,04	0,97	1,01	1,21	1,27	1,1	0,81
D50 :	0,54	0,57	0,41	0,38	0,4	0,52	0,59
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,5 (Fair)
% ALC	11,5
STI	0,51 (Fair)
% ALC	10,9
STIPA female	0,5 (Fair)
% ALC	11,3
RASTI	0,47 (Fair)
% ALC	13,5

STI male	0,49 (Fair)
% ALC	11,8

STIPA male	0,49 (Fair)
% ALC	11,7
STITEL	0,52 (Fair)
% ALC	10,4

<b>POSICIÓN 29</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,937	1,133	1,269	1,281	1,437	1,185	0,999
cc [-]:	0	-0,99	-0,991	-0,991	-0,997	-0,995	-0,989	-0,988
T10 [s]:	0,01	0,708	1,109	1,314	1,466	1,534	1,157	0,814
cc [-]:	-0,971	-0,981	-0,995	-0,995	-0,998	-0,999	-0,996	-0,997
T20 [s]:	0,008	0,644	1,108	1,409	1,55	1,606	1,343	1,074
cc [-]:	-0,911	-0,994	-0,996	-0,997	-0,999	-1	-0,997	-0,995
T30 [s]:	0,008	0,585	1,138	1,447	1,548	1,596	1,407	1,158
cc [-]:	-0,911	-0,984	-0,997	-0,999	-1	-1	-0,999	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>24	28	>45	>50	>44	>40	>47
G [dB]:	-31,17	-19,71	-5,9	3,03	3,31	0,12	4,47

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	621,6	111,7	109,8	117,5	94,4	113,8	95,5
C80 [dB]:	-0,53	0,88	-0,98	-1,78	1,76	-0,84	0,19
D50 [-]:	0,49	0,35	0,17	0,2	0,38	0,32	0,31

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-2,03	7,6	10,45	7,28	4,85	4,15	3,67
ST late [dB]:	-2,05	4,13	9,68	7,87	2,94	5,49	3,97
ST total [dB]:	-1,18	9,1	13,26	10,58	6,99	7,9	6,83

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	13	33	39	34	29	35	40
EDT [s]:	0,94	1,13	1,27	1,28	1,44	1,18	1
D50 :	0,35	0,17	0,2	0,38	0,32	0,31	0,47
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,5 (Fair)
% ALC	11,3
STI	0,51 (Fair)
% ALC	10,5
STIPA female	0,46 (Fair)
% ALC	14
RASTI	0,47 (Fair)
% ALC	13,2

STI male	0,5 (Fair)
% ALC	11,3

STIPA male	0,47 (Fair)
% ALC	13,4
STITEL	0,52 (Fair)
% ALC	10,3

**POSICIÓN 30**  
**EXTERNO MLS**

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	10,454	1,04	0,966	1,011	1,214	1,272	1,105	0,815
CC [-]:	-0,897	-0,962	-0,981	-0,994	-0,999	-0,999	-0,996	-0,985
T10 [s]:	0,042	1,087	0,942	1,243	1,231	1,392	1,109	0,919
CC [-]:	-0,966	-0,966	-0,986	-0,997	-0,999	-0,998	-0,999	-0,997
T20 [s]:	0,047	0,804	1,29	1,203	1,317	1,57	1,479	1,088
CC [-]:	-0,968	-0,99	-0,993	-0,997	-0,999	-0,997	-0,996	-0,999
T30 [s]:	0,039	0,788	1,282	1,139	1,281	1,591	1,905	1,057
CC [-]:	-0,933	-0,985	-0,99	-0,996	-0,997	-0,998	-0,986	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	13	26	25	25	25	25	26
G [dB]:	-170,8	-156,7	-146,2	-137,6	-136	-132,2	-136

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	2177,3	672,2	516,8	555,6	584,4	567	543,1
C80 [dB]:	-5,84	2,02	2,49	1,24	0,5	0,25	2,34
D50 [-]:	0,13	0,54	0,57	0,41	0,38	0,4	0,52

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	7,38	-1,13	-2,5	2,11	4,04	1,76	-1,72
ST late [dB]:	11,71	-0,42	-1,89	2,01	4,79	2,8	-0,72
ST total [dB]:	12,99	2,22	0,81	5,06	7,45	5,32	1,82

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	5	7	6	6	6	6	5
EDT [s]:	1,04	0,97	1,01	1,21	1,27	1,1	0,81
D50 :	0,54	0,57	0,41	0,38	0,4	0,52	0,59
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

STI female	0,5 (Fair)
% ALC	11,5
STI	0,51 (Fair)
% ALC	10,9
STIPA female	0,5 (Fair)
% ALC	11,3
RASTI	0,47 (Fair)
% ALC	13,5

STI male	0,49 (Fair)
% ALC	11,8

STIPA male	0,49 (Fair)
% ALC	11,7
STITEL	0,52 (Fair)
% ALC	10,4

<b>POSICIÓN 30</b>
<b>IMPULSO EXTERNO</b>

REVERBERACIÓN	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]:	-	0,937	1,133	1,269	1,281	1,437	1,185	0,999
cc [-]:	0	-0,99	-0,991	-0,991	-0,997	-0,995	-0,989	-0,988
T10 [s]:	0,01	0,708	1,109	1,314	1,466	1,534	1,157	0,814
cc [-]:	-0,971	-0,981	-0,995	-0,995	-0,998	-0,999	-0,996	-0,997
T20 [s]:	0,008	0,644	1,108	1,409	1,55	1,606	1,343	1,074
cc [-]:	-0,911	-0,994	-0,996	-0,997	-0,999	-1	-0,997	-0,995
T30 [s]:	0,008	0,585	1,138	1,447	1,548	1,596	1,407	1,158
cc [-]:	-0,911	-0,984	-0,997	-0,999	-1	-1	-0,999	-0,997

LEVEL	63	125	250	500	1000	2000	4000
INR [dB]:	>24	28	>45	>50	>44	>40	>47
G [dB]:	-31,17	-19,71	-5,9	3,03	3,31	0,12	4,47

ENERGÍA	63	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [ms]:	621,6	111,7	109,8	117,5	94,4	113,8	95,5
C80 [dB]:	-0,53	0,88	-0,98	-1,78	1,76	-0,84	0,19
D50 [-]:	0,49	0,35	0,17	0,2	0,38	0,32	0,31

STAGE	63	125	250	500	1000	2000	4000
ST early [dB]:	-2,03	7,6	10,45	7,28	4,85	4,15	3,67
ST late [dB]:	-2,05	4,13	9,68	7,87	2,94	5,49	3,97
ST total [dB]:	-1,18	9,1	13,26	10,58	6,99	7,9	6,83

SPEECH	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR [dB]:	13	33	39	34	29	35	40
EDT [s]:	0,94	1,13	1,27	1,28	1,44	1,18	1
D50:	0,35	0,17	0,2	0,38	0,32	0,31	0,47
weight	0,9	1	0,8	0,8	1,3	1,2	1

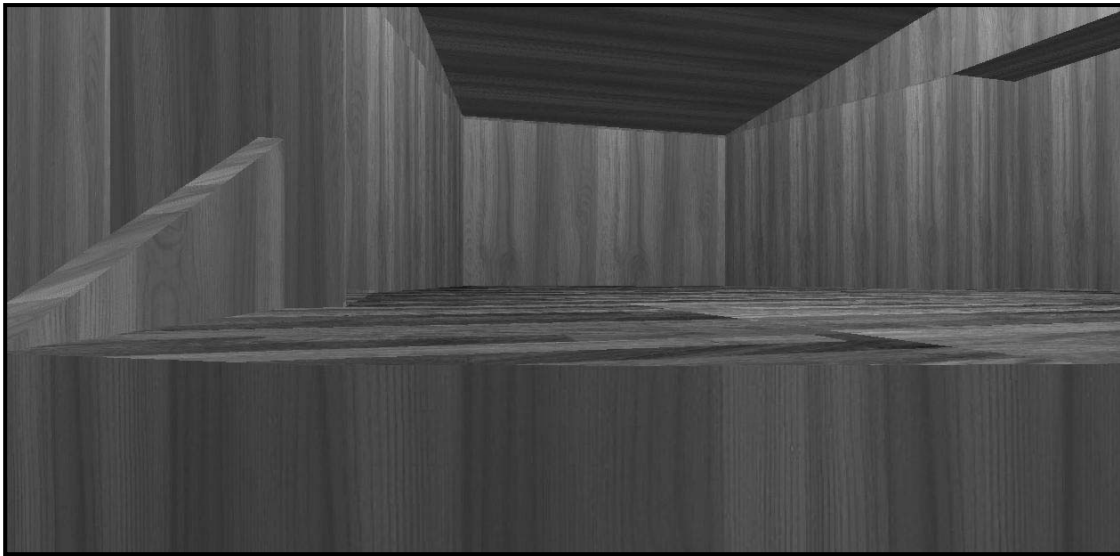
STI female	0,5	(Fair)
% ALC	11,3	
STI	0,51	(Fair)
% ALC	10,5	
STIPA female	0,46	(Fair)
% ALC	14	
RASTI	0,47	(Fair)
% ALC	13,2	

STI male	0,5	(Fair)
% ALC	11,3	

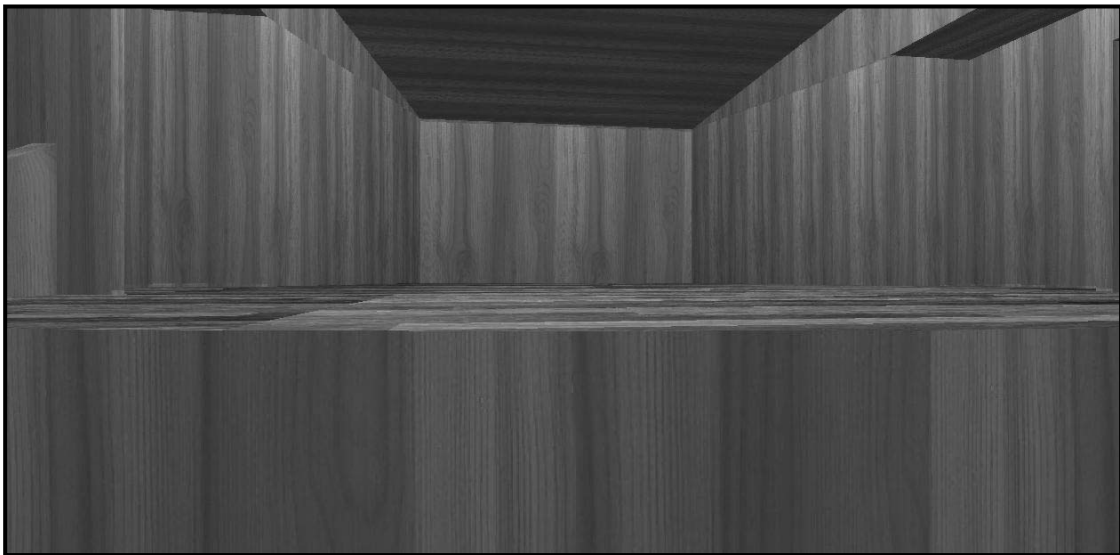
STIPA male	0,47	(Fair)
% ALC	13,4	
STITEL	0,52	(Fair)
% ALC	10,3	

## II.B. Visuales del escenario del Auditorio desde las posiciones de medida

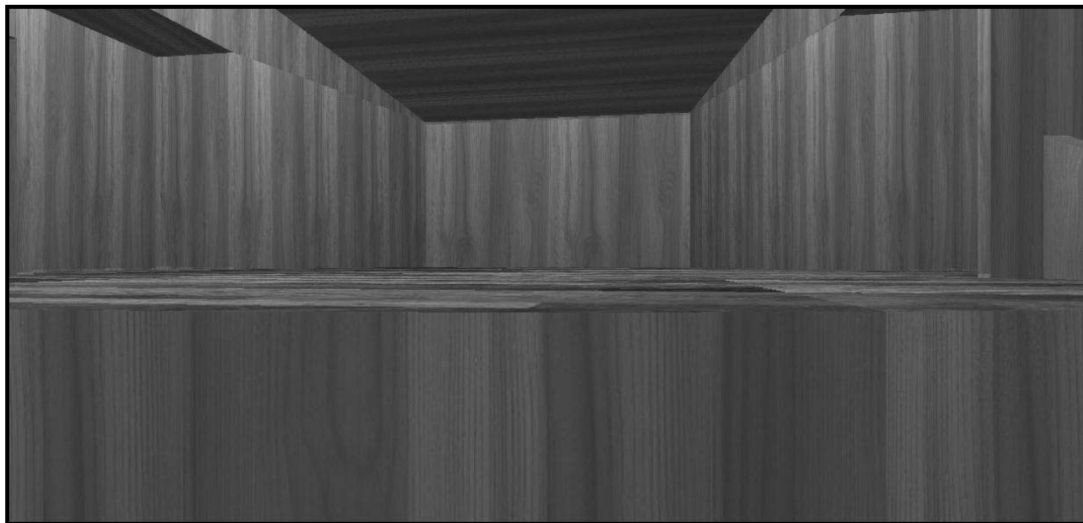
Posición 1



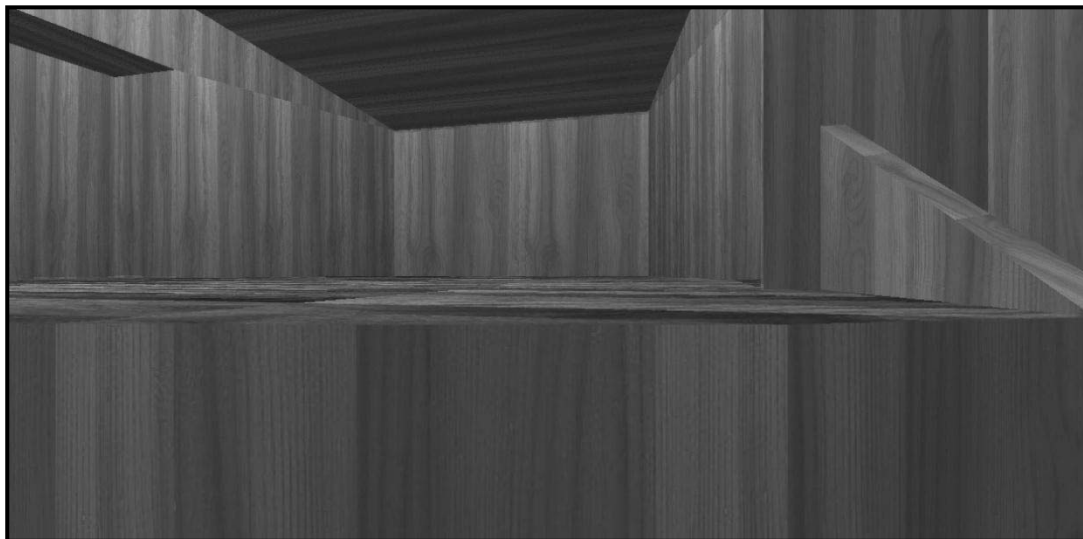
Posición 2



**Posición 3**



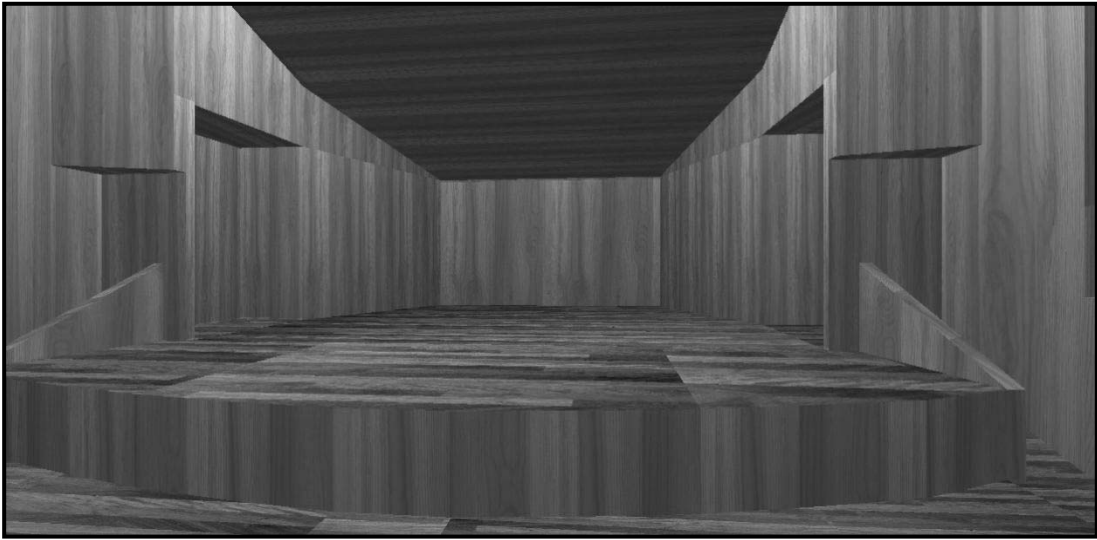
**Posición 4**



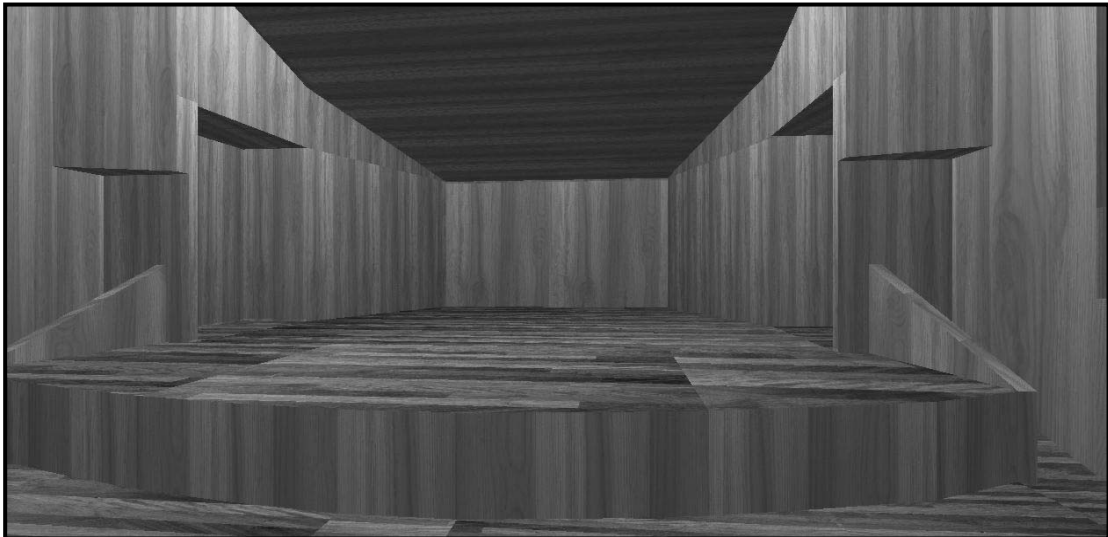
**Posición 5**



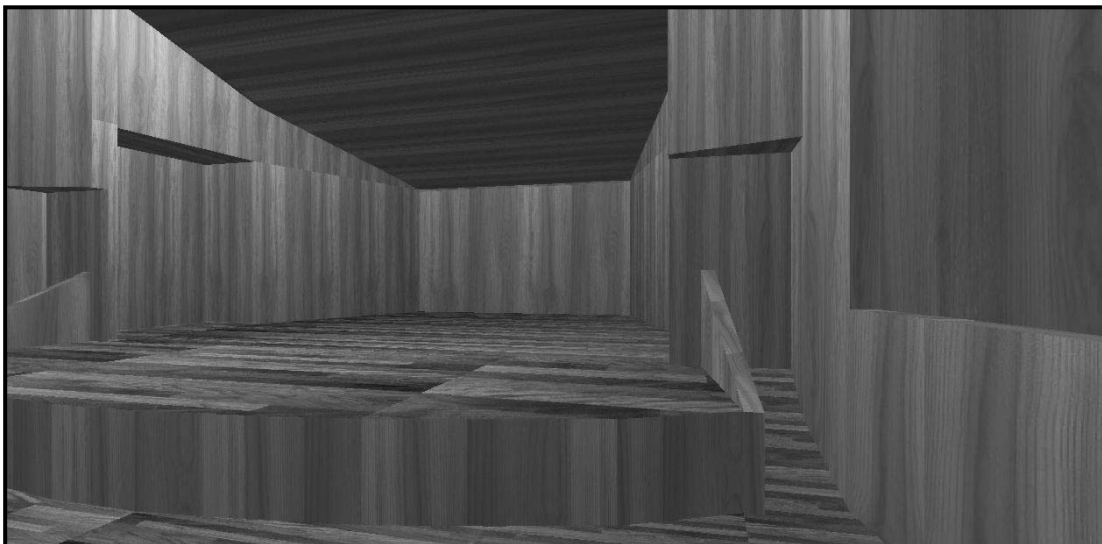
**Posición 6**



**Posición 7**



**Posición 8**



**Posición 9**



**Posición 10**



**Posición 11**





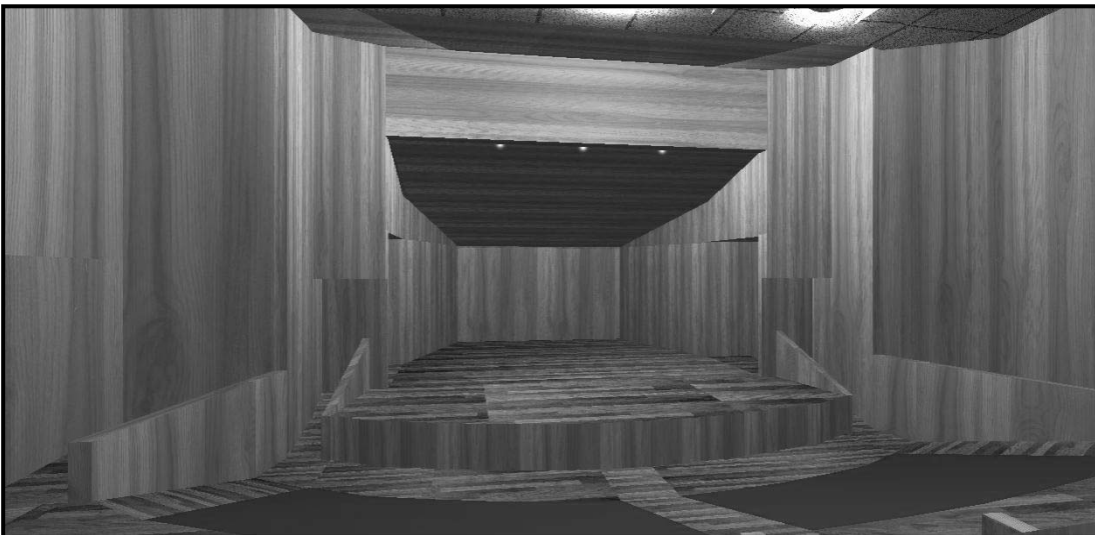
**Posición 12**



**Posición 13**



**Posición 14**



**Posición 15**



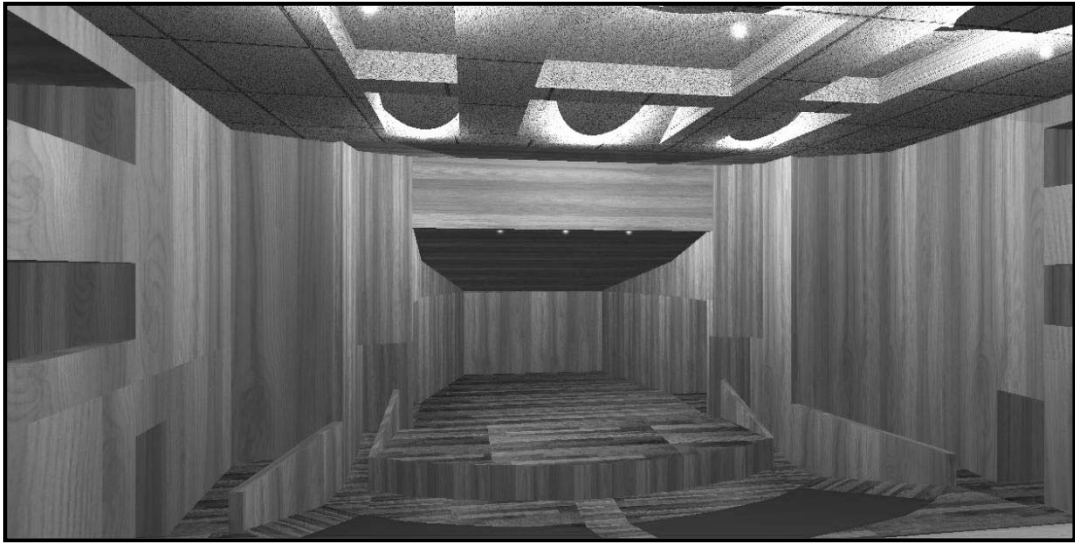
**Posición 16**



**Posición 17**



**Posición 18**



**Posición 19**



**Posición 20**



**Posición 21**



**Posición 22**



**Posición 23**



**Posición 24**



**Posición 25**



**Posición 26**



**Posición 27**



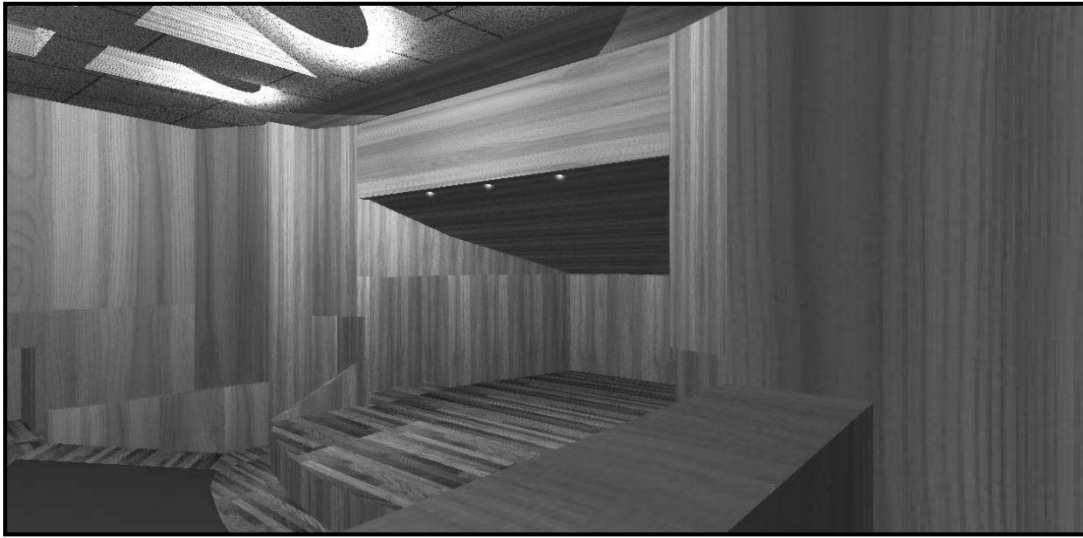
**Posición 28**



**Posición 29**



**Posición 30**







## Anexos III: Caracterización acústica del piano de cola

### III.A. Características del piano Steinway & Sons Model D-274



#### Specifications and Features - Model D

Dimensions	
Height	
Length	8' 11-3/4" (274 cm)
Width	61 1/4" (156 cm)
Depth	
Net Weight	990 pounds (480 kg)

Encasement	
Furniture	Ebonized or Crown Jewel Collection veneer.
Panel Stock	Quarter-sawn poplar corewood crossbanded and face veneered.
Solids	Ebonized birch
Legs	Ebonized birch, Walnut veneer over birch. Locking devices.
Finish	Heavy full-bodied black or clear lacquer; completely hand-rubbed.
Hardware	Solid brass; polished & lacquered.

#### Instrument

##### Rim

Made entirely from hard rock maple; 18 laminations; continuous bent, both inner & outer form one single rim; unequalled strength & stability. Thickness: 3 1/4" (8.26 cm)

##### Braces

5 solid spruce with a volume of 4,052 cu. in. (66,400cm<sup>3</sup>); Spruce provides tensile strength with less weight. Maple dowels fasten braces to rim producing a single homogenous foundation upon which is built the entire tonal component. A cast iron treble bell, affixed to rim's underside at treble bend, holds plate firmly in position by means of a steel bolt. The S & S iron wedge anchors brace ends securely to crossblock assuring permanent rim posture.

**Pinblock**

Hexagrip patented design; 7 laminations of quartered hardrock maple stock. Grain symmetrically distributed at successive angles of 45° or 90° employing grain direction uniformly around the circumference of the tuning pin to provide the ultimate in pin grippage. As a result of this exclusive design, the tuning pin has smoother movement under torque, a more uniform retaining action for solid setting, and a piano which will hold its tuning longer.

**Soundboard**

Created like the soundboard of violins to give a free and even response throughout the entire scale, it is so constructed as to be 9 mm thick in the center and tapered to 6 mm as it approaches the rim and outer case before being DOUBLE CROWNED. This design permits complete freedom of movement, while acting as a homogenous unit to displace a greater amount of air, thereby creating a richer and more lasting tonal response. Close-grained, quarter-sawn Sitka spruce, a wood having unusual stability and vibrance under stress and vibration, is used exclusively for the soundboard.

**Ribs**

Made from durable, resinous sugar pine to assure strong and constant support of string down-bearing on the soundboard. Rib ends are hand-fitted into their mounting surfaces virtually locking in the important soundboard crown.

**Bridges**

Treble: Hard rock maple vertical laminations capped with solid hard rock maple; planed to prescribed height, graphite coated, drilled, and notched by hand for precise individual string bearing. Design defies splitting. Bass: Continuous with treble. Maple doweled, glued, and screwed to soundboard.

**Scale**

Overstring; combination agraffe; Front AND rear duplex. Tension: 45,373 lbs. (20,418 kg)

**Plate**

Sturdy gray iron; filled, hand-milled, and sealed; bronzed and lacquered.

**Tuning Pins**

Premium blued steel with rust-resistant, nicked heads.

**Strings**

TREBLE: Twelve whole & one-half sizes from high-tensile Swedish steel. BASS: Swedish steel core wire wound with pure copper. Longest, agraffe to bridge: 79 1/4" (201 cm)

**Hammers**

18.5-pound (8.39 kg) premium wool top felt over premium wool under felt; treated to resist insects and moisture. Compression-wired to retain permanent shape. Hard birch moldings. Shanks from select resilient maple.

**Dampers**

Horizontal-cut premium wool for effective dampening. Maple heads for endurance.

**Action**

White, quarter-sawn maple parts are bushed with specially treated wool action cloth for freedom from friction. Parts are anchored in hard maple dowels housed in inflexible seamless brass tubing to assure precise & stable regulation. Exclusive single, combination phosphor bronze repetition and fly spring provides constant crisp touch response. Specially designed to respond 14% faster fortissimo & 6% faster pianissimo by using an exclusive combination of half-round balance rail bearings and strategically placed key leads.

**Keys**

Bavarian spruce, individually weighed-off. Chip-proof, stain-resistant coverings for naturals; slip-proof, delicately abraded ebonized sharps. Tough, durable Linden wood buttons reinforce keys over balance rail permitting maximum tonal power with every strike. Longest: 24 1/2" (62.2 cm)

**Keybed**

Made from planks of stable, quarter-sawn spruce. Horizontal planks are freely mortised together, while their ends are permanently mortised into vertical planks, presenting a vented system for humidity escapement while allowing for necessary expansion and contraction. Front center is crowned contrasting the reverse-crowned action frame for snug fit. This design intensifies key movement and prevents "slapping" during heavy playing. Large maple dowel ends provide a solid mount for adjustable brass touch-regulating screws. Thickness: 1-3/4" (4.45 cm)

**Pedals**

Heavy, solid brass. Soft, sustaining, and full sostenuto.

### III.B. Relación de pistas del CD de audio adjunto

Relación de pistas del CD de audio adjunto			
Nº de pista	Estudiadas en la memoria	Nombre de la pista	Descripción
001		La0. Pulsar tecla y mantenerla baja	<b>ARMÓNICOS DOBLE CAÍDA DE LAS ENVOLVENTES</b>  A lo largo de todo el registro
002		Do1. Pulsar tecla y mantenerla baja	
003		Sol1. Pulsar tecla y mantenerla baja	
004		Do2. Pulsar tecla y mantenerla baja	
005		Sol2. Pulsar tecla y mantenerla baja	
006		Do3. Pulsar tecla y mantenerla baja	
007		Sol3. Pulsar tecla y mantenerla baja	
008		Do4. Pulsar tecla y mantenerla baja	
009		Sol4. Pulsar tecla y mantenerla baja	
010		Do5. Pulsar tecla y mantenerla baja	
011		Sol5. Pulsar tecla y mantenerla baja	
012		Do6. Pulsar tecla y mantenerla baja	
013		Sol6. Pulsar tecla y mantenerla baja	
014		Do7. Pulsar tecla y mantenerla baja	
015		Sol7. Pulsar tecla y mantenerla baja	
016		Do8. Pulsar tecla y mantenerla baja	
017		Si1. Pulsar y soltar tecla. ff	<b>DINÁMICA</b>  Registro grave
018		Si1. Pulsar y soltar tecla. mf-f	
019		Si1. Pulsar y soltar tecla. p-mp	
020		Si1. Pulsar y soltar tecla. pp	
021		Do4. Pulsar y soltar tecla. ff	
022		Do4. Pulsar y soltar tecla. mf-f	
023		Do4. Pulsar y soltar tecla. p-mp	
024		Do4. Pulsar y soltar tecla. pp	
025		La6. Pulsar y soltar tecla. ff	Registro agudo
026		La6. Pulsar y soltar tecla. mf-f	
027		La6. Pulsar y soltar tecla. p-mp	
028		La6. Pulsar y soltar tecla. pp	
029		La0. Mantener con Pedal Derecho accionado	<b>PEDAL DERECHO (de RESONANCIA)</b>  A lo largo de todo el registro
030		Do1. Mantener con Pedal Derecho accionado	
031		Sol1. Mantener con Pedal Derecho accionado	
032		Do2. Mantener con Pedal Derecho accionado	
033		Sol2. Mantener con Pedal Derecho accionado	
034		Do3. Mantener con Pedal Derecho accionado	
035		Sol3. Mantener con Pedal Derecho accionado	

036	Do4. Mantener con Pedal Derecho accionado		
037	Sol4. Mantener con Pedal Derecho accionado		
038	Do5. Mantener con Pedal Derecho accionado		
039	Sol5. Mantener con Pedal Derecho accionado		
040	Do6. Mantener con Pedal Derecho accionado		
041	Sol6. Mantener con Pedal Derecho accionado		
042	Do7. Mantener con Pedal Derecho accionado		
043	Sol7. Mantener con Pedal Derecho accionado		
044	Do8. Mantener con Pedal Derecho accionado		
045	<b>Fragmento 1.</b> Sin Pedal Derecho		
046	<b>Fragmento 1.</b> Con Pedal Derecho		
047	La0. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.	<b>PEDAL IZQUIERDO</b> (una Corda)	A lo largo de todo el registro
048	Do1. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
049	Sol1. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
050	Do2. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
051	Sol2. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
052	Do3. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
053	Sol3. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
054	Do4. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
055	Sol4. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
056	Do5. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
057	Sol5. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
058	Do6. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
059	Sol6. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
060	Do7. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
061	Sol7. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
062	Do8. Pulsar y soltar tecla. Sin y Con Pedal Izq.		
063	<b>Fragmento 2.</b> Con Pedal Derecho. Sin Pedal Izq.		
064	<b>Fragmento 2.</b> Con Pedal Derecho. Con Pedal Izq.		
065	<b>Fragmento 3.</b> Con Pedal Derecho. Sin Pedal Izq.		
066	<b>Fragmento 3.</b> Con Pedal Derecho. Con Pedal Izq.	<b>PEDAL CENTRAL</b>	
067	Sol3-Sol5. Pedal Central		
068	Sol6-Sol2. Pedal Central		
069	Sol2-Sol4. Pedal Central		
070	Sol3-Sol1. Pedal Central		
071	<b>Fragmento 4.</b> Sin Pedal Central		
072	<b>Fragmento 4.</b> Con Pedal Central		
073	<b>Fragmento 5.</b> Tocar notas 'sueltas'	<b>COMBINACIONES: PEDAL DERECHO E IZQUIERDO</b>	
074	<b>Fragmento 5.</b> Tocar notas 'ligando'		
075	<b>Fragmento 5.</b> Con Pedal Derecho		
076	<b>Fragmento 5.</b> Con Pedal Izq. Tocar notas 'sueltas'		
077	<b>Fragmento 5.</b> Con Pedal Izq. Tocar notas 'ligando'		
078	<b>Fragmento 5.</b> Con Pedal Izq. Con Pedal Derecho		

079	<b>Escala DoM.</b> Región grave.	<b>COMBINACIONES: PEDAL DERECHO, IZQ. Y CENTRAL</b>	<b>Registro grave</b>		
080	<b>Escala DoM.</b> Región grave. Con Pedal Derecho				
081	<b>Escala DoM.</b> Región grave. Con Pedal Izq.				
082	<b>Escala DoM.</b> Región grave. Con Pedal Izq. y Derecho				
083	<b>Escala DoM.</b> Región aguda.				
084	<b>Escala DoM.</b> Región aguda. Con Pedal Derecho				
085	<b>Escala DoM.</b> Región aguda. Con Pedal Izq.		<b>Registro agudo</b>		
086	<b>Escala DoM.</b> Región aguda. Con Pedal Izq. y Derecho				
087	<b>Fragmento 6.</b> Nota y melodía 'seltas'				
088	<b>Fragmento 6.</b> Nota con Pedal Central				
089	<b>Fragmento 6.</b> Con Pedal Derecho				
090	<b>Fragmento 6.</b> Con Pedal Izq. Nota 'mantenida' y mel. 'suelta'				
091	<b>Fragmento 6.</b> Con Pedal Izq. Nota con Pedal Central	<b>DIRECTIVIDAD</b>	<b>Registro grave</b>		
092	<b>Fragmento 6.</b> Con Pedal Izq. Con Pedal Derecho				
093	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa abierta. Posición 0°			<b>Registro medio</b>	<b>Tapa abierta</b>
094	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa abierta. Posición 60°				
095	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa abierta. Posición 120°				
096	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa abierta. Posición 180°				
097	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa abierta. Posición 240°				
098	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa abierta. Posición 300°				
099	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa cerrada. Posición 0°		<b>Registro medio</b>	<b>Tapa cerrada</b>	
100	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa cerrada. Posición 60°				
101	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa cerrada. Posición 120°				
102	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa cerrada. Posición 180°				
103	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa cerrada. Posición 240°				
104	<b>Fragmento 7.</b> Graves. Tapa cerrada. Posición 300°				
105	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa abierta. Posición 0°	<b>Registro medio</b>	<b>Tapa abierta</b>		
106	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa abierta. Posición 60°				
107	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa abierta. Posición 120°				
108	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa abierta. Posición 180°				
109	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa abierta. Posición 240°				
110	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa abierta. Posición 300°				
111	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa cerrada. Posición 0°	<b>Registro medio</b>	<b>Tapa cerrada</b>		
112	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa cerrada. Posición 60°				
113	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa cerrada. Posición 120°				
114	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa cerrada. Posición 180°				
115	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa cerrada. Posición 240°				
116	<b>Fragmento 8.</b> Medios. Tapa cerrada. Posición 300°				
117	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa abierta. Posición 0°	<b>Registro agudo</b>	<b>Tapa abierta</b>		
118	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa abierta. Posición 60°				
119	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa abierta. Posición 120°				
120	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa abierta. Posición 180°				
121	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa abierta. Posición 240°				
122	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa abierta. Posición 300°				

123	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa cerrada. Posición 0°		Tapa cerrada
124	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa cerrada. Posición 60°		
125	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa cerrada. Posición 120°		
126	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa cerrada. Posición 180°		
127	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa cerrada. Posición 240°		
128	<b>Fragmento 9.</b> Agudos. Tapa cerrada. Posición 300°		
129	Do1-Do2. Vibración por simpatía	VIBRACIÓN POR SIMPATÍA	
130	Do2-Do3. Vibración por simpatía		
131	Do3-Do4. Vibración por simpatía		
132	Do4-Do5. Vibración por simpatía		
133	Do5-Do6. Vibración por simpatía		
134	Do6-Do7. Vibración por simpatía		
135	<b>Fragmento 10.</b> Ejemplo de Vibración por simpatía		
136	Escala cromática ascendente. 88 teclas		
137	<b>PIEZA 1.</b> Chopin - Nocturno en Do# menor Op. Post		
138	<b>PIEZA 2.</b> The Beatles - 'Yesterday'		

**Tabla III.B.1.** Relación de pistas del CD de audio adjunto.

### III.C. Partituras de los fragmentos musicales interpretados

#### Fragmento 1

**Obra:** Nocturno para piano en Si b menor, Op. 9 nº 1.

**Compositor:** F. Chopin.

**Empleada para:** Estudio del efecto del accionamiento del pedal derecho (de resonancia).

Figura III.C.1. Partitura del Fragmento 1.

#### Fragmento 2

**Obra:** Rapsodia para piano Op. 79 nº 1.

**Compositor:** J. Brahms.

**Empleada para:** Estudio del efecto del accionamiento del pedal izquierdo (una *corda*).

Figura III.C.2. Partitura del Fragmento 2.

#### Fragmento 3

**Obra:** Creación propia.

**Empleada para:** Estudio del efecto del accionamiento del pedal izquierdo (una *corda*).

Consiste en la sucesión de 4 acordes arpegiados: la menor, re menor, mi 7 y la menor.

## Fragmento 4

**Obra:** BSO 'Amelie' – 'El Vals de Amelie'

**Compositor:** Yann Tiersen.

**Empleada para:** Estudio del efecto del accionamiento del pedal central (tonal).

Figura III.C.3. Partitura del Fragmento 4.

## Fragmento 5

**Obra:** 2º Mov. de la Sonata para piano Op. 27 nº 1.

**Compositor:** L. W. Beethoven.

**Empleada para:** Estudio del efecto del accionamiento (en distintas combinaciones) de los pedales derecho e izquierdo del piano.

Figura III.C.4. Partitura del Fragmento 5.

## Fragmento 6

**Obra:** creación propia.

**Empleada para:** Estudio del efecto del accionamiento (en distintas combinaciones) de los pedales derecho, izquierdo y central del piano.





Figura III.C.5. Partitura del Fragmento 6.

## Fragmento 7

**Obra:** 'Cuadros de una exposición' - 'The Old Castle'

**Compositor:** M. Mussorgsky

**Empleada para:** Estudio de la directividad en el registro grave del piano.

**Pictures at an Exhibition**  
**The Old Castle**

**Modest Mussorgsky**  
**Arranged by**  
**Vladimir Horowitz**

**Andantino molto cantabile e con dolore**

*pp*

*con espressione*

The image shows a page of a musical score for 'The Old Castle' from 'Pictures at an Exhibition' by Modest Mussorgsky, arranged by Vladimir Horowitz. The score is in G major (one sharp) and 6/8 time. It consists of three systems of piano and bass staves. The first system is marked 'Andantino molto cantabile e con dolore' and 'pp'. The second system is marked 'con espressione'. The third system continues the piece. The bass line features a prominent low register accompaniment.

Figura III.C.6. Partitura del Fragmento 7.

## Fragmento 8

**Obra:** 'Mallorca'.

**Compositor:** I. Albéniz.

**Empleada para:** Estudio de la directividad en el registro medio del piano.

**MALLORCA.**  
Barcarola.

I. Albeniz, Op. 202.

Andantino.

PIANO.

Figura III.C.7. Partitura del Fragmento 8.

## Fragmento 9

**Obra:** BSO 'Forrest Gump' – Main Title

**Compositor:** Alan Silvestri.

**Empleada para:** Estudio de la directividad en el registro agudo del piano.

**FORREST GUMP - MAIN TITLE**  
(FEATHER THEME)  
from the Paramount Motion Picture FORREST GUMP

Music by  
ALAN SILVESTRI

Sweetly

*p*

With pedal

8va

Figura III.C.8. Partitura del Fragmento 9.

## Fragmento 10

**Obra:** 'Mikrokosmos' vol. IV, pieza 102.

**Compositor:** B. Bartok.

**Empleada para:** Estudio de la vibración por simpatía de las cuerdas del piano.

“Las notas en forma de rombo significan que se han de bajar las teclas suavemente sin producir sonido alguno, con lo que se separan los apagadores. El fuerte acorde inicial de la mano derecha induce vibraciones a estas tres notas, que constituirán el acompañamiento de la melodía” [2].

102. Обертоны

Allegro non troppo un poco rubato ♩ = ca 110

*sf* *p dolce*

Figura III.C.9. Partitura del Fragmento 10.

# **PRESUPUESTO**



## 1. Consideraciones generales

Se ha supuesto que la elaboración del Proyecto ha sido encargada a una empresa de investigación y desarrollo legalmente establecida o en su defecto, a un Ingeniero Técnico en Telecomunicaciones el cual está acogido a la modalidad de trabajador autónomo.

## 2. Desglose del presupuesto

### 2.1. Coste de amortización del *software* empleado

En la **tabla P.1** se recogen los precios de las licencias de cada uno de los programas informáticos utilizados durante la realización del Proyecto, así como la cuota de amortización de cada uno de ellos. Se estipula un sistema de amortización lineal, es decir, suponiendo que el inmovilizado material se desprecia de manera constante a lo largo de su vida útil. El valor de la amortización se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$\text{Amortización Software} = \frac{\text{Valor de adquisición} * \text{Periodo de utilización}}{\text{Número de años de vida útil}}$$

Precios y coste de amortización del <i>software</i>				
Elementos de <i>software</i>	Valor de adquisición	Periodo de uso	Periodo de vida	Coste amortización
<b>Parte A</b>				
Dirac 3.0 Room Acoustic Software Brüel & Kjær Type 7841	2.455,00 €	5 meses	7 años	144,13 €
EASE 2.1	2.140,00 €	5 meses	10 años	87,95 €
EASE 4.0	2.560,00 €	5 meses	7 años	150,29 €
SO Windows® XP Professional	136,90 €	5 meses	5 años	23,38 €
<b>Parte B</b>				
Pro Tools® LE 8	146,00 €	5 días	5 años	0,40 €
Sony Sound Forge™ Pro 11.0	354,95 €	9 meses	5 años	52,51 €
Audacity® 2.0.6 ( <i>Software libre</i> )	0,00 €	9 meses	5 años	0,00 €
Multi-Instrument® 3.4	469,50 €	9 meses	5 años	69,46 €
Adobe Audition® CC 2014	334,00 €	9 meses	5 años	49,41 €
Mac® OS X v10.5 'Leopard'	185,50 €	5 días	5 años	33,10 €
<b>Ambas partes</b>				
Microsoft Office® Professional 2010	455,45 €	9 meses	5 años	67,38 €
SO Windows® 7 Home Premium SP1 64-bit	121,86 €	9 meses	5 años	18,03 €
	<b>10.163,58 €</b>			<b>696,04 €</b>

**Tabla P.1.** Precios y coste de amortización del *software* empleado.

Una vez calculada la amortización del *software*, el total asciende a **696,04 € (seiscientos noventa y seis euros con cuatro céntimos de euro)**.

## 2.2. Coste de amortización del *hardware* empleado

La amortización del *hardware* utilizado (**tabla P.2**) se obtiene empleando la siguiente expresión, estimándose que el periodo de vida de los elementos usados es de 5 años.

$$\text{Amortización Hardware} = \frac{\text{Coste hardware} * \text{Periodo de utilización}}{\text{Periodo de vida}}$$

Precios y coste de amortización del <i>hardware</i>				
Elementos de <i>hardware</i>	Valor de adquisición	Periodo de uso	Periodo de vida	Coste de amortización
<b>Parte A</b>				
Ordenador portátil Fujitsu Siemens AMILO Xi-2428	650,30 €	5 meses	5 años	53,45 €
<b>Parte B</b>				
Ordenador de sobremesa iMac 20"	1.079,00 €	5 días	5 años	2,95 €
<b>Partes A y B</b>				
Ordenador portátil Acer Extensa 5635ZG	758,00 €	9 meses	5 años	112,14 €
Impresora Láser a color HP LaserJet Pro 200 M251n	115,00 €	4 días	5 años	0,13 €
	<b>2.602,30 €</b>			<b>168,67 €</b>

**Tabla P.2.** Precios y coste de amortización del *hardware*.

Teniendo en cuenta todo esto la amortización englobada dentro del período de utilización se eleva a **168,67 € (ciento sesenta y ocho euros con sesenta y siete céntimos de euro)**.

## 2.3. Coste de amortización de los equipos

A continuación, en la **tabla P.3**, se detalla la relación de equipos utilizados y el coste de cada uno de ellos.

Precios de los equipos					
Equipos	Marca	Modelo	Unid.	Precio Unid.	Subtotal
<b>Parte A</b>					
Fuente sonora	Brüel & Kjaer	4224	1	830,00 €	830,00 €
Sonómetro modular de precisión	Brüel & Kjaer	2231	1	3.200,00 €	3.200,00 €
Trípode	Brüel & Kjaer	UA-1577	1	450,00 €	450,00 €
Grabadora digital	Marantz	PMD-670	1	648,00 €	648,00 €
Telémetro láser	Bosch	Pro DLE 50	1	146,90 €	146,90 €
<b>Parte B</b>					
Micrófono	Behringer	C-3	6	82,00 €	492,00 €
Previo de micrófonos	Behringer	Ultragain Pro	1	118,00 €	118,00 €



		Mic2200			
Mesa de control	Digidesign	Digi 002	1	415,00 €	415,00 €
Pie de micrófono jirafa	JB Systems	MS-21	6	27,55 €	27,55 €
Auriculares de estudio	Sennheiser	HD-203	1	39,90 €	39,90 €
<b>Partes A y B</b>					
Micrófono	Brüel & Kjaer	4189	1	225,00 €	225,00 €
Adaptador micrófono	Brüel & Kjaer	UA-0035	1	150,00 €	150,00 €
					<b>6.742,35 €</b>

**Tabla P.3.** Precios de los equipos utilizados.

Para calcular la amortización de los equipos se usa la siguiente fórmula:

$$\text{Amortización equipos} = \frac{\text{Coste equipos} * \text{Periodo de utilización}}{\text{Periodo de vida}}$$

En la **tabla P.4** se especifica la amortización de cada equipo así como la amortización total. Se considera que el periodo de vida de los elementos usados es de 10 años.

<b>Coste de amortización de los equipos</b>				
Equipos	Subtotal Precios	Periodo de uso	Periodo de vida	Coste de amortización
<b>Parte A</b>				
Fuente sonora B&K 4224	830,00 €	2 días	10 años	0,45 €
Sonómetro modular de precisión B&K 2231	3.200,00 €	2 días	10 años	1,75 €
Trípode B&K UA-1577	450,00 €	2 días	10 años	0,25 €
Grabadora digital Marantz PMD-670	648,00 €	2 días	10 años	0,35 €
Telémetro láser Bosch Pro DLE 50	146,90 €	1 día	10 años	0,04 €
<b>Parte B</b>				
6 micrófonos Behringer C-3	492,00 €	2 días	10 años	0,32 €
Previo de micrófonos Behringer Ultragain Pro Mic2200	118,00 €	2 días	10 años	0,06 €
Mesa de control Digi 002	415,00 €	2 días	10 años	0,34 €
6 pies de micrófono jirafa	165,30 €	2 días	10 años	0,11 €
Auriculares de estudio Sennheiser HD-203	39,90 €	2 días	10 años	0,02 €
<b>Partes A y B</b>				
Micrófono B&K 4189	225,00 €	4 días	10 años	0,24 €
Adaptador micrófono B&K UA-0035	150,00 €	4 días	10 años	0,16 €
				<b>4,09 €</b>

**Tabla P.4.** Coste de la amortización de los equipos utilizados.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, la amortización total de los equipos dentro del período de utilización asciende a **4,09 € (cuatro euros con nueve céntimos de euros)**.

## 2.4. Alquiler de la sala

Reservar el Auditorio del Conservatorio de Música de Las Palmas de G. C. durante una hora cuesta 100€.

Alquiler del recinto		
Actividades realizadas	Nº de horas	Coste
<b>Parte A</b>		
Medida dimensional de la sala	6	600,00 €
Medida de la respuesta impulsiva del recinto (DIRAC)	24	2.400,00 €
<b>Subtotal</b>	<b>30</b>	<b>3.000,00 €</b>
<b>Parte B</b>		
Montaje, realización de pruebas, desmontaje, etc.	5	500,00 €
Grabación de las muestras sonoras del piano de cola	5	500,00 €
<b>Subtotal</b>	<b>10</b>	<b>1.000,00 €</b>
		<b>4.000,00 €</b>

**Tabla P.5.** Coste del alquiler de la sala.

Teniendo en cuenta que se dispuso del recinto durante 40 horas, el importe total del alquiler asciende a **4.000,00 € (cuatro mil euros)**.

## 2.5. Honorarios de la pianista

Se ha establecido a la pianista unos honorarios de 60€ por hora de trabajo. Considerando que se emplearon 5 horas en realizar las grabaciones de las muestras sonoras del piano, el coste final se eleva a **300,00 € (trescientos euros)**.

## 2.6. Trabajo tarifado por tiempo empleado

El Ministerio de Economía y Hacienda remitió a todos los colegios profesionales una nota en la que se les recordaba que, siguiendo directivas europeas, se debían eliminar los baremos orientativos de honorarios que tradicionalmente venían publicando. Por ello, y haciendo notar que los honorarios son libres y responden al libre acuerdo entre el profesional y su cliente, se enumeran algunos de los conceptos a tener en cuenta en el cálculo de dichos honorarios **[50]**.

- Costes directos del ingeniero y de sus colaboradores. Se tiene que considerar el coste de las horas de todos los integrantes del equipo de trabajo y las empleadas en trabajos técnicos, reuniones con el promotor, instalador, arquitecto, constructor, organismo públicos y en el caso de la dirección de obra las visitas a realizar.
- Viajes, dietas, hoteles, delineación, mecanografía, reproducción y encuadernación, etc. imputables al trabajo encomendado.

- Porcentaje del total año de gastos generales que se repercuten a cada trabajo concreto como los derivados de impuestos del trabajo personal, alquiler de local, amortización de equipos, seguridad social, intereses de préstamos, etc.
- Derechos de visado y tasas administrativas si procede (Ministerio, Jefatura, Ayuntamiento, etc.).
- El número de horas a emplear en cada trabajo dependerá de la experiencia del ingeniero y de las herramientas y bases de datos que disponga.
- Otro factor a tener en cuenta es el volumen de actividad con cada cliente.

Lo indicado en los puntos anteriores supone únicamente una orientación al ingeniero para el cálculo de sus honorarios, sin que de ninguna manera pueda presuponerse su carácter oficial.

En base a lo expuesto anteriormente se determina unos honorarios de **12.000,00 € (doce mil euros)**.

## 2.7. Redacción, impresión y encuadernación del Proyecto

### 2.7.1. Redacción

En este caso se seguirá la recomendación del COITT referente al cálculo del valor monetario de la redacción de proyectos. Esta sugiere que el mismo sea de un **7%** del valor del presupuesto (P).

El valor de **P** se halla sumando los costes de las secciones anteriores tal y como se muestra en la **tabla P.6**.

<b>P = Presupuesto subtotal</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Coste de amortización del <i>software</i>	696,04 €
Coste de amortización del <i>hardware</i>	168,67 €
Coste de amortización de equipos	4,09 €
Alquiler de la sala	4.000,00 €
Honorarios de la pianista	300,00 €
Trabajo tarifado por tiempo empleado	12.000,00 €
<b>P = 17.168,80 €</b>	

**Tabla P.6.** P = Presupuesto subtotal.

Teniendo en cuenta el valor de **P** calculado en la tabla anterior, la **redacción del Proyecto** asciende a una cuantía de **1.201,82€ (mil doscientos un euros con ochenta y dos céntimos de euro)**.

### 2.7.2. Impresión y encuadernación

Además, se deben añadir otros gastos asociados a la impresión y encuadernación del Proyecto (**tabla P.7**).

<b>Presupuesto de impresión y encuadernación</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Papel de impresión	19,20 €
Tóneres de impresión de color	185,97 €
Tóner de impresión negra	59,99 €
Encuadernación	16,50 €
	<b>281,66 €</b>

**Tabla P.7.** Presupuesto de impresión y encuadernación.

La impresión y encuadernación del mismo asciende a un coste de **281,66 € (doscientos ochenta y un euros con sesenta y seis céntimos de euro)**.

## 3. Derechos de visado del COITT

El COITT establece que los derechos de visado referentes a “OTR: Redacción de Documentos (Proyectos, certificados, estudios, etc.) no incluidos en ningún otro epígrafe de estas tablas” se calculan a razón de la siguiente ecuación [50]:

$$\text{Derechos de visado} = 0,007 * \text{Presupuesto total (sin impuestos)}$$

<b>Presupuesto total (sin impuestos)</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Coste de amortización del <i>software</i>	696,04 €
Coste de amortización del <i>hardware</i>	168,67 €
Coste de amortización de equipos	4,09 €
Alquiler de la sala	4.000,00 €
Honorarios de la pianista	300,00 €
Trabajo tarifado por tiempo empleado	12.000,00 €
Redacción del Proyecto	1.201,82€
Impresión y encuadernación	281,66 €
	<b>18.652,28 €</b>

**Tabla P.8.** Presupuesto total (sin impuestos ni derechos de visado del COITT).

Teniendo en cuenta la fórmula anterior y los datos de la **tabla P.8**, los derechos de visado ascienden a **130,57 €**. Además, hay añadir **9 €** correspondientes a los gastos administrativos del visado digital, sumando un total de **139,57 € (ciento treinta y nueve euros con cincuenta y siete céntimos de euro)**.

#### 4. Presupuesto total

Sumando todos los conceptos calculados hasta el momento, y aplicando los correspondientes recargos debidos a impuestos se obtiene el presupuesto total del Proyecto.

<b>Cálculo del Presupuesto Total</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Importe</b>
<b>P = Presupuesto subtotal</b>	17.168,80 €
Redacción, impresión y encuadernación del Proyecto	1.483,48 €
Derechos de visado del COITT + Gasto administrativo del visado digital	139,57 €
<b>Presupuesto (sin impuestos)</b>	<b>18.791,85 €</b>
<b>Impuestos aplicables IGIC (7%)</b>	<b>1.315,43 €</b>
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	<b>20.107,28 €</b>

**Tabla P.9.** Presupuesto total.

Por tanto, el presupuesto para el presente Proyecto asciende a la cantidad de **20.107,28€ (veinte mil ciento siete euros con veintiocho céntimos de euro)**.

Las Palmas de Gran Canaria, a 9 de junio de 2015

La ingeniera proyectista,

Fdo.: Cristina Quintana Quintana.



# **PLIEGO DE CONDICIONES**





## **PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA**

1. Fuente sonora Brüel & Kjaer Modelo 4224
2. Sonómetro modular de precisión Brüel & Kjaer Modelo 2231
3. Trípode Brüel & Kjaer Modelo UA-1577
4. Ordenador portátil Fujitsu Siemens Amilo Xi-2428
5. Grabadora Digital Marantz PMD-670
6. Telémetro Láser DLE 50 Professional Bosch

## **PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA**

7. Micrófono de condensador Behringer C-3
8. Previo de micrófonos Behringer Ultragain PRO MIC2200
9. Ordenador de sobremesa iMac®
10. Controlador DIGI 002
11. Pie de micrófono JB Systems (MS-21)
12. Auriculares de estudio Sennheiser HD-203

## **PARTES A y B**

13. Micrófono Brüel & Kjaer Modelo 4189
14. Adaptador de Micrófono Brüel & Kjaer Modelo UA-0035
15. Ordenador portátil Acer Extensa 5635ZG



# PARTE A: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA

## 1. Fuente sonora Brüel & Kjaer Modelo 4224



### Sound Source

**USES:**

- Building acoustics measurements such as sound reduction index, facade insulation, reverberation time and absorption
- Sound insulation measurements according to Simple Test Method of ASTM E597-77T
- Power amplifier and pink noise generator included
- Produces shaped spectra according to ASTM E 597-77 T
- Diffuser for improved reproducibility of insulation measurements
- 0°, 30° or 45° inclination of cabinet for facade insulation measurements

**FEATURES:**

- 115dB sound power (battery driven) or 118dB (mains driven) in the range 100 Hz to 4 kHz
- Compatible with Building Acoustics Analyzer Type 4418

The Sound Source Type 4224 is specifically designed for building acoustics measurements such as sound reduction index, facade insulation, reverberation time and absorption. The Type 4224 consists of a loudspeaker with built-in power amplifier and noise generator contained in a robust, moulded cabinet with an integral handle. It can deliver up to 115dB sound power level from 100Hz to 4 kHz when driven from its internal, rechargeable batteries or up to 118dB sound power level when driven from a mains supply. In spite of its impressive performance the Type 4224 weighs only 18kg (40lbs).

The Sound Source Type 4224 is a portable and robust instrument capable of producing high noise levels. It is thus eminently suited for in situ building acoustics measurements.

The Type 4224 can be used with a wide variety of B & K instruments to form both simple easily portable set-ups as well as larger set-ups for automatic measurements. Sound insulation and reverberation measurements in octave bands can be made using a sound level meter and octave filter set, e.g. Type 2235 and Type 1624, together with Level Recorder Type 2317. A more sophisticated system for use with the sound source would be a Modular Precision Sound Level Meter Type 2231 and 1/1-1/3 Octave Filter Set Type 1625 with the Reverberation Processor Module BZ 7104.

When used in conjunction with the Building Acoustics Analyzer Type 4418 and a microphone, the 4224 constitutes a powerful and portable system for the automatic measurement

and calculation of all the commonly used quantities in building acoustics according to both national and international standards (Fig.2).

The conical diffuser, seen in Fig.2, can be snap-locked onto the front of the cabinet, to improve the reproducibility of sound insulation measurements and to render the measured results less dependent on the position and the angle of inclination of the cabinet. When not in use the diffuser can be stowed in the pocket of the instrument's protective cover.

In its wide band mode, the Sound Source Type 4224 produces a pink noise signal from 100Hz to 4 kHz. To produce bands of noise, this signal can be fed to an external 1/3 or 1/1 octave filter, before amplification and reproduction by the loudspeaker. Two special filter networks within the 4224 can be switched into the circuit to shape the noise signal to produce spectrum I and spectrum II in accordance with "Simple test method for measuring sound insulation" ASTM E597-77T (Fig.3). For this method the only other instrument required is



a sound level meter, for example Type 2222.

A Calibration Attachment is supplied with the 4224 to provide a well-defined microphone position for a near-field measurement of the sound pressure level in front of the cabinet (see Fig.4). This measurement is used



Fig. 1. Control panel of the 4224



Fig.2. The Sound Source Type 4224 fitted with its diffuser. Here used in conjunction with the Building Acoustics Analyzer Type 4418 to measure reverberation time in a cafeteria

in the determination of the "calibration constant" which is required for the "Simple test method" (see ASTM E597-77T for details). When not in use the Calibration Attachment is held by a clip on the rear of the cabinet.

The circuitry of the Type 4224 is already prepared to receive additional filter networks if other types of shaped spectra are desired.

The output level can be attenuated in steps of 10dB over a 40 dB range, and varied continuously. Lamps on the control panel indicate when the delivered sound power exceeds the maximum for continuous use ("Overload") and when it is within 3dB of the overload condition ("Upper 3 dB").

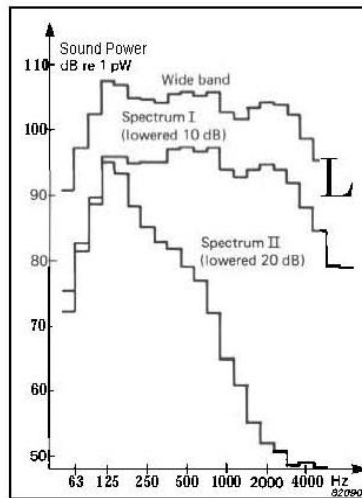


Fig.3. Sound power spectra with the 4224 operating at full power for a) Wide Band b) Spectrum I and c) Spectrum II. For the sake of clarity the curves for Spectrum I and Spectrum II have been lowered 10dB and 20dB respectively

There is no danger of overheating the Type 4224 as it is protected by a thermostat which switches off the instrument if it becomes too warm after prolonged use at high power. Operation is then inhibited until the instrument cools down.

A "Remote Control" socket is provided

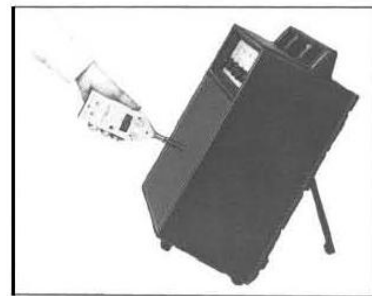


Fig.4. The inclination of the cabinet can be set at 0°, 30° or 45° required by certain standards and for facade insulation measurements. Here a Sound Level Meter Type 2222 is inserted in the Calibration Attachment during the determination of the "calibration constant"

to enable the Sound Source to be remotely switched on or off which is necessary in certain set-ups for measuring reverberation time. This facility also enables the battery power to be used more efficiently during insulation measurements.

The Type 4224 can be operated from its internal batteries, from a mains supply or from an external DC supply. The operating time with the internal batteries is sufficient for almost all purposes. A battery charger is incorporated for re-charging the internal batteries.

## Specifications 4224

<p><b>SOUND POWER LEVEL:</b> 0 to 118 dB re 1 pW, mains operated 0 to 115 dB re 1 pW, battery operated. Variable attenuation from 0 to -40 dB in 10 dB steps. Continuously variable</p> <p><b>SOUND POWER SPECTRUM:</b> Wide band: 100 Hz to 4 kHz, +0dB to -10 dB re max. level. 63 Hz to 10 kHz, +0dB to -30 dB re max. level <b>Ext. Filter:</b> 1/3 &amp; 1/1 oct. with ext. Filter Type 1613, 1616 (battery operated), 1617 or 1618 (mains operated) Spectrum I: Fulfills ASTM E 597-77T Spectrum II: Fulfills ASTM E 597-77T</p>	<p>sound power level. Max. 5 V peak. Impedance 150 kΩ</p> <p><b>SOUND POWER OFF:</b> Stops the signal (to -60 dB) in less than 30ms without transient overload</p> <p><b>REMOTE CONTROL:</b> Remote control of Sound Power Off. TTL Levels</p> <p><b>POWER SUPPLY:</b> Class II instrument complying with IEC 348. Mains operated 100 V to 240 V, 50 Hz to 60 Hz. Built-in batteries, 10 NiCd cells. External Supply 12 to 17 V DC 6A.</p>	<p><b>DIMENSIONS AND WEIGHT</b> Height: 480 mm (19 in) Width: 380mm (15in) Depth: 242 mm (9,5 in) Weight: 16 kg (401bs)</p> <p><b>ENVIRONMENT</b> Temperature Range: (for operation within specifications) + 5°C to + 40°C Maximum Relative Humidity: 30% Storage Temperature: - 25°C to + 70°C</p>
<p><b>OVERLOAD INDICATION:</b> Indicates max. sound power level (overload) and -3 dB re overload</p> <p><b>PINK NOISE OUTPUT (TO EXTERNAL FILTER INPUT):</b> Pink noise from 50 Hz to 10 kHz; 0,7 V RMS. Max. load 500 Ω</p> <p><b>EXT. GEN. INPUT (FROM EXTERNAL FILTER OR EXTERNAL GENERATOR OUTPUT):</b> 115mV to 2V RMS corresponding to max.</p>	<p><b>POWER CONSUMPTION:</b> 65 W at full load</p> <p><b>BUILT-IN BATTERY CHARGER:</b> Recharging time using mains supply: 14 hours</p> <p><b>OPERATING TIME WITH NiCd CELLS:</b> Approx. 3/4 hour at full power (-3dB re overload). Approx 4 hours and 8 hours at reduced power of -13 dB and -30 dB re overload respectively.</p>	<p><b>ACCESSORIES INCLUDED:</b> Plastic Cover ..... KF 0091 Diffuser Cone ..... U.A. 0745 Calibration Attachment ..... DP 0401 Mains Cable ..... A0020 4 pin plug ..... JP 0401 8 pin plug ..... JP 0802 Fuse 1 ..... 25 A VF 0027 Fuse 6.3 A VF ..... 0044 Fuse 0.63 A ..... VF 0032 Instruction Manual</p> <p><b>ACCESSORIES AVAILABLE:</b> Service Manual</p>



WORLD HEADQUARTERS: Dk.-2850 Naerum/Denmark Telephone: +45 2 80 05 00 Telex: 37316 brukd dk

Amsterdam (020) 498 1941 - Australia (02) 939 75 90 - Belgium (02) 242 97 45 - Brazil (248) 8149 - Canada (514) 695-8225 - Finland (09) 80 17 044 - France (1) 64 57 20 10  
Germany (030) 40 00 00 - Italy (06) 49 40 60 - Great Britain (01) 254 2966 - Holland 03402-38994 - Hong Kong 5-487486 - Italy (02) 52 44 141  
Japan (03) 571 3311 - Korea (02) 293-3686 - Norway 02-78 70 96 - Singapore (225) 8558 - Spain (91) 205 1000 - Sweden (08) 7112730 - Switzerland (042) 651161  
USA (617) 339-6000 - FAX (617) 461 7000 Local representatives and service organisations world-wide

## 2. Sonómetro modular de precisión Brüel & Kjaer Modelo 2231

# 6. Specifications 2231

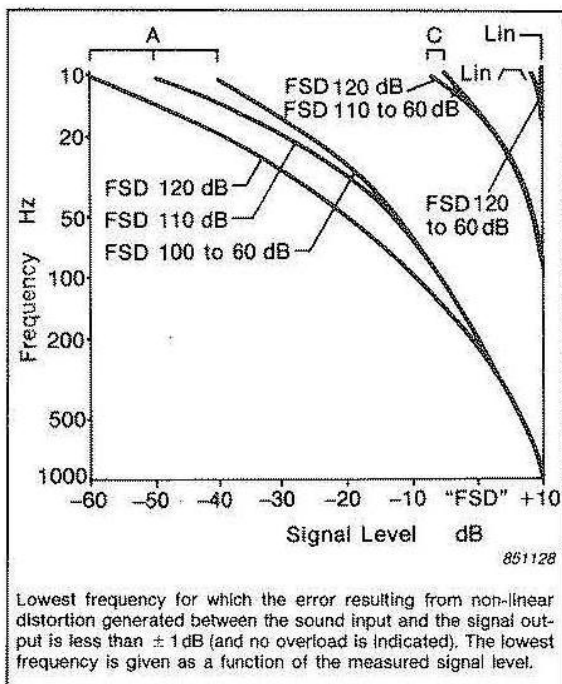
**MEASURING RANGE:**  
With standard microphone (Type 4155):

FSD <sup>1)</sup>	Measuring Range		
	Lower limit for S/N ratio > 5 dB (A-weighting)	Max. peak level	Upper limit for signals of crest factor 10 (= 20 dB)
60	24	73	53
70	24	83	63
80	24	93	73
90	30	103	83
100	40	113	93
110	50	123	103
120	60	133	113
130 <sup>2)</sup>	70	143	123
140 <sup>2)</sup>	80	153 <sup>3)</sup>	133 <sup>3)</sup>

- 1) FSD on quasi-analogue display  
2) Only with attenuator ZF0020 employed  
3) Max. values may diverge slightly from nominal value depending on microphone K<sub>0</sub> factor

**FREQUENCY WEIGHTING:**  
A, C weighting in accordance with IEC 651 type 0  
Linear (10 Hz to 20 kHz)  
All-pass (2 Hz to 70 kHz)

**DETECTOR:**  
Characteristics: RMS, peak  
Linearity range: 70 dB  
Pulse range: 73 dB  
Crest factor capability: 13 dB at FSD



**TIME WEIGHTING CHARACTERISTICS:**  
"T": to IEC 651 type 1 (type 0)  
"F": to IEC 651 type 1 (type 0)  
"S": to IEC 651 type 1 (type 0)  
"Peak": rise time < 50 μs  
Max. Hold decay rate: 0 dB/s (digital)

**L<sub>eq</sub> RESPONSE TIME FOR CONSTANT INPUT SIGNAL:**  
1 s

**CONVERTIBILITY:**  
**Loading:** Enabled by module insertion: module removed after loading into internal memory. Every application module has its own frontplate.  
**Capacity:** 4 kbyte ROM for general routines, tables etc. 16 kbyte RAM for application software and data storage.  
**Interface:** Via optional Brüel & Kjaer Serial Interface Module ZI9100. Open circuit signal level ± 5 V (min. Send level ± 2 V, min. Receive level ± 1 V).

**DISPLAY:**  
**Digital:** 4 digits, 14 segments, liquid crystal, 8 mm high, resolution 0,1 dB  
**Quasi-analogue:** 60 dB scale with 2 dB resolution for monitoring current SPL (RMS or Peak)  
**Additional functions:**  
Overload occurring: ↑  
Overload has occurred: \*  
Battery near low level: BAT flashing  
Battery low level: BAT flashing plus ↑ (non-resettable)

**AC OUTPUT:**  
1 V RMS for full scale, output impedance < 120 Ω, short circuit protected, mini-jack socket.

**DC OUTPUT:**  
3 V for full scale (5 V to indicate overload condition), 0 V bottom scale, 50 mV/dB, output impedance < 100 Ω, short circuit protected, mini-jack socket.

**RESET FUNCTION:**  
**Reset All:** Max./min. detectors, L<sub>eq</sub>, SEL and overload detector are reset  
**Reset Max./Min.:** Only max./min. detectors are reset  
Automatic Reset occurs when certain key settings are changed

**MICROPHONE:**  
**Type:** 1/2-inch B & K Prepolarized Condenser Microphone Type 4155  
**Nominal Sensitivity:** 50 mV/Pa  
**Capacitance:** 15 pF  
**Windscreen effect:** < 0,9 dB up to 10 kHz

## 6. Specifications 2231

**POLARIZATION VOLTAGE:** Selectable: 0V, 28V, 200V. Allows use of almost any microphone in the Brüel & Kjær range.

**CALIBRATION:**

**Acoustical:** With Sound Level Calibrator Type 4230 or Pistonphone Type 4220 by potentiometer adjustment

**Electrical:** With internal reference source by potentiometer adjustment

**REFERENCE CONDITIONS FOR ACOUSTICAL CALIBRATION (AS OBTAINED WITH TYPE 4230):**

**Type of Sound Field:** Free

**Reference Incidence Direction:** Perpendicular to microphone diaphragm

**Reference SPL:** 94 dB (re 20  $\mu$ Pa)

**Reference Frequency:** 1 kHz

**Reference Temperature:** 20°C

**Reference Measuring Range:** 110dB FSD

**WARM-UP TIME:** <5 s

**EFFECT OF HUMIDITY (AT 40°C AND 1000 Hz):**

<0,5 dB for 30% <RH<90%

**EFFECT OF TEMPERATURE:**

**Microphone:** -0,006 dB/K typically

**Complete instrument:**

<0,5 dB (-10 to +50°C)

**Operating range:**

-10 to +50°C (+14 to 122°F)

**Storage without batteries:**

-20 to +70°C (-4 to 158°F)

**EFFECT OF MAGNETIC FIELD:**

80 A/m (1 Ørsted) at 50 Hz gives:

<25dB (A) or <44dB (Lin)

**VIBRATION SENSITIVITY:** 72 dB max. at 40 Hz and 1 ms<sup>-2</sup>.

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY:**

Complies with Class B computing device of the American FCC (Federal Communications Commission) Rules.

**BATTERIES:**

**Type:** Four 1,5 V, LR6 or AA size Alkaline cells (B&K order No. QB 0013).

**Life:** approx. 8 hours

**OVERALL DIMENSIONS AND WEIGHT:**

370 × 85 × 47 mm (14,7 × 3,3 × 1,8 in)

860 g (1,9 lb) with batteries

**ACCESSORIES INCLUDED:**

Half-inch Prepolarized Condenser

Microphone ..... Type 4155

2,5 mm Mini-Jack Plug (×2) ..... JP 0213

Windscreen ..... UA 0237

Input Adaptor ..... JJ 2614

Screwdriver ..... QA 0001

Alkaline Cells (×4) ..... QB 0013

20 dB Attenuator ..... ZF 0020

Integrating SLM Module ..... BZ 7100

**ACCESSORIES AVAILABLE:**

Sound Level Calibrator ..... Type 4230

Pistonphone ..... Type 4220

Level Recorder Cable ..... AO 0173

3 m Microphone Extension Cable ..... AO 0027

Carrying Case ..... KE 0226

Statistical Analysis Module ..... BZ 7101

“Taktmaximal” Module ..... BZ 7102

Interface Module ..... ZI 9100

### 3. Trípode Brüel & Kjaer Modelo UA-1577



UA-1577	Tripod including CAM head
---------	---------------------------

### 4. Ordenador portátil Fujitsu Siemens Amilo Xi-2428



**General**

Weight: 3 kg  
Height: 3.7 cm  
Depth: 27.2 cm  
Width: 36 cm  
Built-in Devices: Stereo speakers, wireless LAN aerial, Bluetooth aerial  
System Flash Memory: Intel Turbo Memory (1 GB)  
System Type: Notebook  
Platform Technology: Intel Centrino Duo  
MPN: CCN:GBR-110117-002, MUI:NOR-110117-001, MUI:NOR-110117-002  
Windows Vista Certification: Windows Vista Premium Ready  
Localisation: Danish, English, Norwegian, Finnish, Swedish

**Processor**

Chipset Type: Mobile Intel PM965 Express  
Data Bus Speed: 667 MHz, 800 MHz  
64-bit Computing: Yes  
Multi-Core Technology: Dual-Core  
Processor: Intel Core 2 Duo T7250 / 2 GHz, Intel Core 2 Duo T7100 / 1.8 GHz, Intel Core 2 Duo T7500 / 2.2 GHz

**Cache memory**

Installed Size: 2 MB, 4 MB  
Type: L2 Cache

**Ram**

Configuration Features: 2 x 1 GB, 1 x 1 GB  
Technology: DDR2 SDRAM, DDR2 SDRAM - 667 MHz  
Installed Size: 2 GB / 2 GB (max), 1 GB / 2 GB (max)  
Memory Specification Compliance: PC2-5300

**Storage**

Hard Drive: 250 GB - Serial ATA-150 - 5400 rpm, 160 GB - Serial ATA-150

**Optical storage**

Type: DVD±RW (±R DL) / DVD-RAM - integrated, DVD±RW (±R DL) - integrated  
Read Speed: 24x (CD) / 8x (DVD)  
Write Speed: 24x (CD) / 8x (DVD±R) / 4x (DVD-R DL) / 2.4x (DVD+R DL)  
CD / DVD Rewrite Speed: 16x (CD) / 6x (DVD±RW)

**Card reader**

Supported Flash Memory Cards: SD Memory Card, Memory Stick, Memory Stick PRO, MultiMediaCard, xD-Picture Card  
Type: 5 in 1 card reader

**Display**

Widescreen Display: Yes  
Max Resolution: 1280 x 800 ( WXGA )  
Display Type: 15.4" TFT  
Features: BrilliantView

**Video**

Video Memory: DDR2 SDRAM - 256 MB  
Graphics Processor / Vendor: NVIDIA GeForce 8600M GS TurboCache supporting 767MB, NVIDIA GeForce 8600M GS TurboCache  
Total Available Graphics Memory: 512 MB, 1 GB

**Audio**

Features: 7.1 SPDIF  
Compliant Standards: High Definition Audio  
Audio Output: Sound card  
Audio Input: Microphone

**Notebook camera**

Sensor Resolution: 1.3 Megapixel  
Camera Type: Integrated  
Camera Features: Autofocus



**Manufacturer's product description**

The AMILO Xi 2428 runs a 15.4-inch screen and weighs 6.6 pounds.

**Input device(s)**

Features: Volume control

Type: Keyboard, remote control, touchpad

**Telecom**

Protocols & Specifications: ITU V.92

Max Transfer Rate: 56 Kbps

Modem: Fax / Modem

**Networking**

Compliant Standards: IEEE 802.11b, IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n (draft), Bluetooth 2.0

Data Link Protocol: Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, IEEE 802.11b, IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE

802.11n (draft), Bluetooth 2.0

Wireless NIC: Intel Wireless WiFi Link 4965AGN

Wireless LAN Supported: Yes

Networking: Network adapter

**Expansion / connectivity**

Interfaces:

1 x display / video - HDMI

1 x display / video - VGA - 15 pin HDD-Sub (HD-15)

1 x display / video - S-video output

1 x IEEE 1394 (FireWire)

1 x storage - eSATA - 7 pin external Serial ATA

3 x Hi-Speed USB - 4 PIN USB Type A

1 x modem - phone line - RJ-11

1 x network - Ethernet 10Base-T/100Base-TX/1000Base-T - RJ-45

1 x audio - SPDIF output/headphones

1 x microphone - input - mini-phone 3.5mm

1 x audio - line-in - mini-phone stereo 3.5 mm

Expansion Slots Total (Free):

2 ( 0 ) x memory

1 ( 1 ) x ExpressCard/54, 2 ( 1 ) x memory

1 ( 1 ) x ExpressCard/54

**Miscellaneous**

Included Accessories: Remote control

Compliant Standards: ACPI 2.0, ISO 13406-2

**Power**

Voltage Required: AC 120/230 V ( 50/60 Hz )

Power Device: External

**Battery**

Run Time (Up To): 2 hour(s)

Capacity: 2200 mAh

Installed Qty: 1

Technology: 6-cell Lithium Ion

**Operating system / software**

Software: Drivers & Utilities, Microsoft Works 8.5, Norton Internet Security 2007 (90 days subscription),

Microsoft Office Home and Student Edition (60 days trial)

OS Provided: Microsoft Windows Vista Home Premium

**Manufacturer warranty**

Service & Support Details: Limited warranty - 1 year - pick-up and return

Service & Support: 1 year warranty

**Flash memory**

Installed Size: 1 GB

**Environmental parameters**

Min Operating Temperature: 5 °C

Max Operating Temperature: 35 °C

Humidity Range Operating: 10 - 90%

## 5. Grabadora Digital Marantz PMD-670



### PMD670 Solid State Recorder

### *technical specifications*



<b>GENERAL</b>	
Number of channels	2 (stereo), 1 (mono)
Usable media	CF memory cards, Microdrives
Recording and media methods	MPEG1 Layer II compression MPEG1 Layer III compression MPEG2 Layer III compression* (*for all half sample rates) 16 bit linear PCM
.mp2	
.mp3	
.mp3	
PCM	
<b>AUDIO</b>	
Recording bit rate (selectable)	
MP2 stereo	384, 256, 192, 128, 96, 64 kbps
MP2 mono	192, 128, 96, 64, 48, 32 kbps
MP3 stereo	320, 256, 160, 128, 80, 64 kbps
MP3 mono	160, 128, 80, 64, 40, 32 kbps
Sampling Frequency	
Analog	48, 44.1, 32, 24*, 22.050*, 16* kHz (*except MP2)
Digital	48, 44.1kHz (PCM 44.1kHz), 20,000 Hz (-0.5dB)
Frequency response	LINE86dB / MIC 65dB
Signal-to-Noise Ratio	LINE 0.03% / MIC 0.08%
Total Harmonic Distortion at 0 VU (PCM)	86 dB
Dynamic Range	
<b>INPUTS / OUTPUTS</b>	
<b>MIC IN L/R</b>	
Type	XLR (1:GND, 2:HOT, 3:COLD)
Input Sensitivity	1.2mVrms/5.5 kohms
<b>LINE IN L/R</b>	
Type	RCA Jack
Input Sensitivity	300mVrms/20 kohms
<b>LINE OUT L/R</b>	
Type	RCA Jack
Standard Level	2 Vrms max./2 kohms
<b>DIGITAL IN/OUT</b>	
Type	RCA Jack
Impedance	75 ohms
Standard level	0.5 Vp-p
Sampling frequency	44.1/48 kHz
Format	SPDIF (IEC-958 Type II)
<b>POWER CONSUMPTION</b>	
Recording/Playback	5.2 W
Charging	12 W
Standby (battery driven)	2.2mW
Headphone Out power	20 mW/32 ohms
Speaker Output power	100 mW
Phantom power	+48V, 10mA
<b>DIMENSIONS (maximum)</b>	
Width	10.4 in. (264 mm)
Height	2 in. (55 mm)
Depth	7.3 in. (185 mm)
Weight	2 lbs. 14 oz.(1.3 Kg)

**input/output**

- balanced XLR (L/R) microphone In
- unbalanced line In/out (rca/cinch)
- unbalanced digital In/out (rca/cinch)
- remote control Input (2.5mm Jack)
- USB

**applications**

- broadcast—radio, tv, internet & multimedia
- meeting recording—municipal, corporate, legal
- linguistic recording—oral history, linguistic research, speech therapy
- bioacoustic (wildlife) recording
- law enforcement recording
- medical recording

**included accessories**

- power supply
- user manual
- alkaline battery holder
- removable top panel cover
- usb cable
- shoulder strap

**Please note:**  
Specifications are based on measurement conditions and proper care for the machine. Marantz reserves the right to change design and specification without notice. Availability of models may vary by territory.

## 6. Telémetro Láser DLE 50 Professional Bosch

Características técnicas	DLE 50 Professional	
Margen de medición	0,05–50 m	
Exactitud de medida	± 1,5 mm	
Tiempo de medición	min.: 0,5 s; máx.: 4 s	
Diodo de láser	635 nm, < 1 mW	
Clase de láser	2	
Indicador de batería baja	-	
Protección contra polvo y salpicaduras de agua	IP54	
Conexión del trípode	directa 1/4"	
Alimentación de tensión	4 pilas de 1,5 V LR030 (AAA) o 4 baterías de 1,2 V KR03 (AAA). Sin cambiar de pilas es posible efectuar unas 30.000 mediciones.	
Tamaño	100 x 58 x 32 mm	
Peso (pilas incl.)	175 g	
Suministro de serie	Bolsa de protección, asidero, baterías, instrucciones de manejo.	

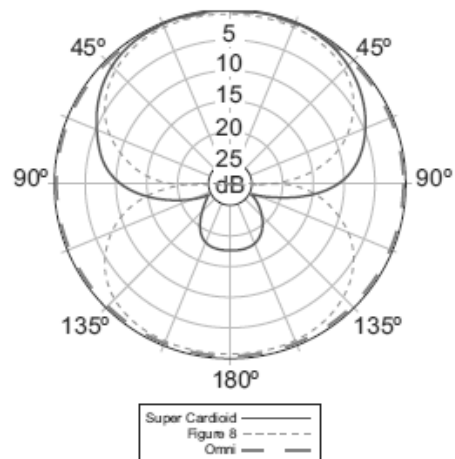
**PARTE B: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PIANO DE COLA**

**7. Micrófono de condensador Behringer C-3**

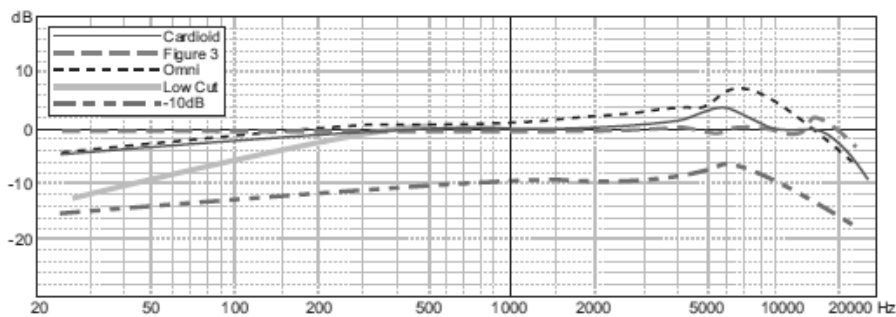


**DATOS TÉCNICOS**

Tipo de transductor:	condensador, 16 mm
Patrón polar:	cardioide, figura de 8, omni
Conexión:	conector XLR balanceado chapado en oro
Sensibilidad de circuito abierto:	-40 dBV/pa (10 mV/pa)
Respuesta de frecuencia:	40 Hz - 18 kHz
SPL máx.:	142 dB ( $\leq 0,5\%$ THD @ 1 kHz)
SPL equivalente:	23 dBA (IEC 651)
Rango dinámico:	119 dB
Impedancia nominal:	350 $\Omega$
Voltaje:	+48 V
Toma de corriente:	7.0 mA
Dimensiones:	$\varnothing$ mango: 54 mm, longitud: 180 mm
Peso:	aprox. 0.45 kg



*Diagrama polar*



*Respuesta de frecuencia*

## 8. Preamplificador de micrófonos Behringer Ultragrain PRO MIC2200



### DATOS TÉCNICOS

#### ENTRADAS DE AUDIO

##### Micrófono

Conectores	conectores XLR
Tipo	sin transformador, desacoplada de CC
Impedancia	3 kOhm balanceado
Nivel de entrada máximo	+10 dBu balanceado y no balanceado
CMRR	típico 40 dB, > 55 dB @ 1 kHz

##### Linea

Conectores	conectores XLR y jack de 6,3 mm
Tipo	entrada sin transformador, desacoplada de CC
Impedancia	60 kOhm balanceado
Nivel de entrada máximo	+23 dBu balanceado y no balanceado
CMRR	típico 40 dB, > 55 dB @ 1 kHz

#### SALIDAS DE AUDIO

Conectores	conectores XLR y jack de 6,3 mm
Tipo	controladas electrónicamente por la etapa de salida servo balanceada
Impedancia	60 Ohm balanceada, 30 Ohm no balanceada
Nivel máximo de salida	+21 dBu dBm balanceado y no balanceado

#### DATOS DEL SISTEMA

Rango de frecuencias	10 Hz hasta 200 kHz, +/- 3 dB
Relación señal/ruido	> 94 dBu, sin carga, 22 Hz hasta 22 kHz
THD	0,011 % tip. @ +4 dBu, 1 kHz, amplificación 1
IMD	0,01 % tip. SMPTE
Diafonía	< -88 dB, 22 Hz hasta 22 kHz

#### CONTROLES DE FUNCION

Mic Gain	variable (+10 hasta +60 dB)
Frequency (Lo Cut)	variable (12 hasta 320 Hz)
Frequency (PEQ)	variable (10 Hz hasta 20 kHz), dependiendo de los conmutadores x 10- x 0.1
Bandwidth	variable (0,03 hasta 2 octavas)
Level	variable (-15 dB hasta +15 dB)
Output	variable (-20 dB hasta +20 dB)

**CONMUTADORES DE FUNCION**

+48 V	activación de la alimentación fantasma
Mic/Line	conmutación entre preamplificador de línea o preamplificador de micrófono
Phase Rev.	inversión de fase (180°)
Lo Cut	activación del filtro pasaaltos
x0.1	conmutación del control de frecuencia de 10 Hz a 200 Hz
x 10	conmutación del control de frecuencia de 1 kHz a 20 kHz
EQ In/Out	activación del filtro paramétrico

**INDICADORES**

Clip	LED de control de saturación
Output Level	indicador LED de doce segmentos: -30/-24/-18/-12/-6/-3/0/+3/+6/+9/+12/+18 dB
Conmutadores de función	Indicador LED para cada conmutador

**ALIMENTACION DE CORRIENTE**

Tensión de red	USA/Canada	115 V ~, 60 Hz
	U.K./Australia	240 V ~, 50 Hz
	Europe	230 V ~, 50 Hz
	Modelo de exportación	100 - 120 V ~, 200 - 240 V ~, 50 - 60 Hz
Consumo	máximo	20 W
Fusible	100 - 120 V ~: T	500 mA H
	200 - 240 V ~: T	250 mA H
Conector a la red	conector para aparatos europeo estándar	

**DIMENSIONES/PESO**

Medidas (alto * ancho * prof.)	aprox. 1 3/4" (44,5 mm) * 19" (482,6 mm) * 8 1/2" (217 mm)
Peso	aprox. 3 kg
Peso de transporte	aprox. 4,2 kg

**9. Ordenador de sobremesa iMAC®**

<b>Procesador</b>	Core 2 Duo de Intel a 2,66 GHz	
<b>Caché de nivel 2</b>	6 MB compartidos	
<b>Bus frontal</b>	1.066 MHz	
<b>Memoria</b>	2 GB de SDRAM DDR3 a 1.066 MHz (en dos módulos SODIMM de 1 GB); admite hasta 8 GB	
<b>Disco duro</b>	Serial ATA de 320 GB <sup>2</sup> a 7.200 rpm	
<b>Unidad óptica</b>	SuperDrive a 8x de carga por ranura con grabación de doble capa a 4x (DVD±R DL, DVD±RW y CD-RW)	
<b>Pantalla</b>	LCD TFT panorámica brillante de matriz activa y 20 pulgadas (visibles), 1.680 x 1.050 píxeles y millones de colores	
<b>Vídeo</b>	Cámara iSight integrada; salida Mini DisplayPort compatible con conexiones de imagen DVI, DVI de doble canal y VGA mediante adaptador <sup>4</sup>	
<b>Gráficos</b>	GeForce 9400M de NVIDIA con 256 MB de SDRAM DDR3 compartida con la memoria principal <sup>2</sup>	
<b>FireWire</b>	Un puerto FireWire 800 (7 vatios)	
<b>USB</b>	Cuatro puertos USB 2.0 en el ordenador y dos USB 2.0 en el teclado	
<b>Sonido</b>	Altavoces incorporados con un amplificador digital de 24 vatios, micrófono incorporado, salida de audio para altavoces y óptica digital, entrada de audio óptica digital y de líneas	
<b>Gigabit</b>	10/100/1000BASE-T (Gigabit) integrada	
<b>Conexión inalámbrica</b>	Wi-Fi AirPort Extreme (802.11n) integrada <sup>2</sup> Bluetooth 2.1 + EDR integrado (Enhanced Data Rate)	
<b>Accesorios de equipo</b>	Ratón Mighty Mouse y teclado Apple Keyboard	
<b>Otros</b>	Receptor de infrarrojos incorporado	
<b>Opciones de configuración a medida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampliación de memoria a 4 GB (dos de 2 GB)</li> <li>• Disco duro de 640 GB o 1 TB</li> <li>• Teclado Apple Keyboard con teclado numérico</li> <li>• Teclado inalámbrico Wireless Keyboard de Apple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampliación de memoria a 8 GB (dos de 4 GB)</li> <li>• Ratón Mighty Mouse inalámbrico de Apple</li> <li>• Módem USB de Apple</li> <li>• Mando Apple Remote</li> <li>• Programas: iWork '09, Aperture, Logic Express y Final Cut Express</li> </ul>

## 10. Controlador DIGI 002



*FireWire-based Pro Tools Mini Studio with Integrated Control Surface*

### FEATURES

#### 18 CHANNELS OF I/O FEATURING:

- 8 analog inputs with 4 mic pres with individual gain and high-pass filter; 48V phantom power enabled on channel pairs
- 8 analog outputs; Outputs 1 & 2 mirrored on 1/4" TRS Monitor Output (with dedicated volume control), headphone output on 1/4" TRS (with dedicated volume control knob), and RCA-based -10 dBV fixed output
- 8 channels of ADAT optical I/O or 2 channels of optical S/PDIF I/O
- 2 channels of S/PDIF I/O on RCA connectors
- Alternate Source Input for direct monitoring of -10 dBV audio equipment (tape players, CD players, etc.)
- 24-bit/96 kHz converters, up to >108 dB Dynamic Range and >98 dB (0.002%) THD+N

#### ADDITIONAL FEATURES:

- 8 touch-sensitive motorized faders
- 8 motion-sensitive rotary encoders used for pan/send/meter/plug-in control
- 10 scribble strips for track name, pan, send, fader, plug-in values and timeline position
- Transport control
- MIDI I/O – 1 IN port, 2 OUT ports (16 channels in, 32 channels out)
- Footswitch for QuickPunch control



**SPECIFICATIONS**

<p><b>A/D</b></p> <p><b>Sample Rate:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 44.1, 48, 88.2, 96 kHz</li> </ul> <p><b>Max Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inputs 1-4 (mic): +3 dBu</li> <li>• Inputs 1-4 (line): +18 dBu</li> <li>• Inputs 5-8 (+4 mode): +18 dBu</li> </ul> <p><b>Gain Range:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inputs 1-4: Mic Setting: +15 - +65 dB; Line/DI Setting: +0 - +50 dB</li> <li>• Inputs 5-8 – fixed +4 dBu or –10 dBV, -14 dB headroom</li> </ul> <p><b>Mic E.I.N (unweighted):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inputs 1-4: –126 dBu @ 65 dB gain, 150 ohm source, 20 Hz – 20 kHz</li> </ul> <p><b>THD+N:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inputs 1-4(mic): 0.004%, 62 dB gain <sup>1,3</sup></li> <li>• Inputs 1-4 (line): 0.004%, +17 dBu signal <sup>1,3</sup> (minimum gain)</li> <li>• Inputs 5-6: 0.002% @ +17 dBu input level</li> <li>• Inputs 7-8: 0.003% @ +17 dBu input level</li> </ul> <p><b>Dynamic range:</b> <sup>1,2</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inputs 1-4: &gt;101 dB (A-weighted), 98 dB (unweighted)</li> <li>• Inputs 5-8: &gt;108 dB (A-weighted), 105 dB (unweighted) <sup>5</sup></li> <li>• Alt Source Inputs: &gt;99 dB (A-weighted), 97 dB (unweighted)</li> </ul> <p><b>Frequency Response:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• +0.15 / -0.5 dB, 20 Hz – 20 kHz</li> </ul> <p><b>Input Impedance:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inputs 1-4 (XLR): 2 kohm</li> <li>• Inputs 1-4 (1/4"): 10 Mohm</li> </ul>	<p><b>D/A</b></p> <p><b>Sample Rate:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 44.1, 48, 88.2, 96 kHz</li> </ul> <p><b>Max Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Main (1-2), Monitor, and Outputs (3-8): +18 dBu</li> <li>• Alt. –10 dBV Outputs: +4 dBV</li> <li>• Headphone Outputs: +15 dBu, 150 ohm load</li> </ul> <p><b>THD+N:</b> <sup>1,3,4</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Main Outputs: &lt;0.0016% (-95 dB)</li> <li>• Monitor Outputs: &lt;0.0016% (-95 dB)</li> <li>• Outputs 3-8: &lt;0.0023% (-93 dB)</li> <li>• Alt. –10 dBV Outputs: &lt;0.0023% (-93 dB)</li> </ul> <p><b>Dynamic range:</b> <sup>1,3,4</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Main Outputs: 114 dB (A-weighted), 112 dB (unweighted)</li> <li>• Monitor Outputs: 112 dB (A-weighted), 110 dB (unweighted)</li> <li>• Outputs 3-8: 114 dB (A-weighted), 112 dB (unweighted)</li> <li>• Alt. –10 dBV Outputs: 98 dB (A-weighted), 95 dB (unweighted)</li> </ul> <p><b>Frequency Response:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• +0.15 / -0.5 dB, 20 Hz – 20 kHz</li> </ul> <p><b>Output Impedance:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 50 ohms</li> </ul> <hr/> <p><b>Dimensions</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• W = 18.9 in /48.3 cm</li> <li>• D = 17.1 in /43.5 cm</li> <li>• H = 6.1 in /15.6 cm</li> </ul> <p><b>Weight:</b> 15 lbs, 3.2 oz /6.9 kg</p> <p><b>FireWire cable</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 6-pin to 6-pin, 12 ft / 3.7 m</li> </ul>
<p><i>1 Measurement made using balanced connectors</i></p> <p><i>2 ADC measured -60 dBFS method with a gain setting such that +18 dBu = 0 dBFS at S/PDIF output</i></p>	<p><i>3 Measured relative to level at 1 kHz</i></p> <p><i>4 Measured with digital input at -60 dBFS @ 1 kHz</i></p> <p><i>5 Measured using "+4" setting</i></p>

## 11. Pie de micrófono JB Systems (MS-21)



### Características

- Pie de micrófono con jirafa ajustable.
- Base de metal
- Altura: de 100 cm hasta 176 cm.
- Largura de la jirafa: de 53 cm hasta 91 cm.

## 12. Auriculares de estudio Sennheiser HD-203



## Overview

The HD 203 are a pair of closed, dynamic hi-fi stereo headphones that are particularly ideal for working at the mixing desk with powerful modern music. Providing good insulation against ambient noise, a vivid, crisp bass response is also experienced.

Rugged and lightweight, these headphones deliver a comfortable and secure fit and can be used for both mobile sources and home (mini) hi-fi systems.

### Features

- Closed, supra-aural, dynamic hi-fi stereo headphones
- Good attenuation of ambient noise
- Powerful neodymium magnets and lightweight diaphragms for high sound levels
- Extremely comfortable to wear due to ultra-lightweight design, even for extended listening
- Rugged outdoor design with extremely flexible headband
- 3m highly conductive OFC copper cable
- Replaceable leatherette ear pads
- 2-year warranty

## Technical Data

### Color

<b>Impedance</b>	32 $\Omega$
<b>Frequency response</b>	18 - 18000 Hz
<b>Sound pressure level (SPL)</b>	115 dB
<b>THD, total harmonic distortion</b>	<0.5%
<b>Ear coupling</b>	Supra-aural
<b>Jack plug</b>	Jack 3,5 mm stereo
<b>Transducer principle</b>	Dynamic, closed

### What's in the box?

- 1 HD 203
- 1 adaptor to 1/4" (6.3mm) stereo jack

## PARTES A Y B

### 13. Micrófono Brüel & Kjaer Modelo 4189



#### Specifications 4189

<p><b>OPEN-CIRCUIT SENSITIVITY (250 Hz):</b> -26 dB ±1.5 dB re 1 V/Pa, 50 mV/Pa <b>POLARIZATION VOLTAGE (external):</b> 0 V <b>FREQUENCY RESPONSE*:</b> 0° incidence free-field response: ±1 dB, 10 Hz to 8 kHz ±2 dB, 6.3 Hz to 20 kHz In accordance with IEC 651, Type 1 <b>LOWER LIMITING FREQUENCY (-3 dB):</b> 2 Hz to 4 Hz (vent exposed to sound) <b>PRESSURE EQUALIZATION VENT:</b> Rear vented <b>DIAPHRAGM RESONANCE FREQUENCY:</b> 14 kHz (90° phase shift) <b>CAPACITANCE (POLARIZED, 250 Hz):</b> 14 pF <b>EQUIVALENT AIR VOLUME (101.3 kPa):</b> 46 mm<sup>3</sup> <b>CALIBRATOR LOAD VOLUME (250 Hz):</b> 260 mm<sup>3</sup> <b>PISTONPHONE TYPE 4228 CORRECTION (with DP 0776):</b> 0.00 dB <b>CARTRIDGE THERMAL NOISE:</b> 14.6 dB (A), 15.3 dB (Lin.)</p> <p>* Individually calibrated</p>	<p><b>UPPER LIMIT OF DYNAMIC RANGE (3% distortion):</b> &gt; 146 dB SPL <b>MAXIMUM SOUND PRESSURE LEVEL:</b> 158 dB (peak)</p> <p><b>Environmental</b> <b>OPERATING TEMPERATURE RANGE:</b> -30 to +150 °C (-22 to 302 °F) <b>OPERATING HUMIDITY RANGE:</b> 0 to 100% RH (without condensation) <b>STORAGE TEMPERATURE:</b> -30 to +70 °C (-22 to 158 °F) <b>Data Disk:</b> 5 to 50 °C (41 to +122 °F) <b>TEMPERATURE COEFFICIENT (250 Hz):</b> -0.001 dB/°C (for the range -10 to +50 °C (14 to 122 °F)) <b>PRESSURE COEFFICIENT (250 Hz):</b> -0.010 dB/kPa <b>INFLUENCE OF HUMIDITY:</b> &lt;0.1 dB/100%RH <b>VIBRATION SENSITIVITY (&lt;1000 Hz):</b> 62.5 dB equivalent SPL for 1 m/s<sup>2</sup> axial acceleration</p>	<p><b>MAGNETIC FIELD SENSITIVITY:</b> 6 dB SPL for 80 A/m, 50 Hz field <b>ESTIMATED LONG-TERM STABILITY:</b> &gt;1000 years/dB (dry air at 20 °C (68 °F)) &gt;2 hours/dB (dry air at 150 °C (302 °F)) &gt;40 years/dB (air at 20 °C (68 °F), 90% RH) &gt;1 year/dB (air at 50 °C (122 °F), 90% RH)</p> <p><b>Dimensions</b> <b>Diameter:</b> 13.2 mm (0.52") (with grid) 12.7 mm (0.50") (without grid) <b>Height:</b> 17.6 mm (0.69") (with grid) 16.3 mm (0.64") (without grid) <b>Thread for preamplifier mounting:</b> 11.7 mm - 60 UNS</p> <p><b>Note:</b> All values are typical at 23 °C (73.4 °F) 101.3 kPa and 50% RH, unless measurement uncertainty or tolerance field is specified. All uncertainty values are specified at 2σ (i.e. expanded uncertainty using a coverage factor of 2)</p>
--	--	---

#### Ordering Information 4189

<p><b>Type 4189</b> Prepolarized Free-field 1/2" Microphone <b>Includes the following accessories:</b> BC 0224: Calibration Chart</p> <p>* Quote mic. serial number when re-ordering</p>	<p><b>BC 5002:</b> Microphone-data Disk*</p> <p><b>Optional Accessories</b> <b>Type 2669:</b> 1/2" Microphone Preamplifier <b>Type 4231:</b> Sound Level Calibrator <b>Type 4226:</b> Multifunction Acoustic Calibrator</p>	<p><b>Type 4228:</b> Pistonphone <b>UA 0308:</b> Dehumidifier <b>UA 0254:</b> Set of 6 Windscreens (UA 0237), 90 mm (3.5") <b>UA 0469:</b> Set of 6 Windscreens (UA 0459), 65 mm (2.6") <b>BA 5105:</b> Microphone Handbook</p>
--	---	---

### 14. Adaptador de Micrófono Brüel & Kjaer Modelo UA-0035



<b>Adaptors for Mounting Preamplifiers and Extension Rods with Microphones of Different Diameters</b>	
UA-0035	1/4-inch microphone to 1/2-inch preamplifier (driven shield 0.33 pF), Length = 72.5 mm

## 15. Ordenador portátil Acer Extensa 5635ZG



### Specifications for Acer Extensa 5635ZG-443G50N W7HP Pentium T4400 2.20GHz, 3(2x1)GB RAM

Product Description	Acer Extensa 5635ZG-443G50N - 15.6" - Pentium T4400 - Windows 7 Home Premium 64-bit - 3 GB RAM - 500 GB HDD
EAN	4718235546052
Manufacturer Warranty	1 year warranty
Dimensions (WxDxH)	37 cm x 24.3 cm x 3.5 cm
Weight	2.5 kg
Processor	Intel Pentium T4400 / 2.2 GHz / 1 MB Cache
Networking	802.11b/g/n (draft) , Gigabit Ethernet
Product Type	Notebook
Display	15.6" LED backlight 1366 x 768 / HD
Battery	6-cell - up to 2 hours
Operating System	Windows 7 Home Premium 64-bit
Memory	3 GB DDR3
Optical Drive	DVD SuperMulti DL
Environmental Standards	ENERGY STAR Qualified
Microsoft Office Preloaded	Includes a pre-loaded image of select Microsoft Office 2010 suites. Purchase an Office 2010 Product Key Card or disc to activate preloaded software on this PC.
Graphics	NVIDIA GeForce G105M - 512 MB
Storage	500 GB HDD

<b>Connections &amp; Expansion</b>	
Memory Card Reader	5 in 1 (SD Card, Memory Stick, Memory Stick PRO, MultiMediaCard, xD-Picture Card)
Interfaces	3 x USB 2.0 VGA LAN Audio line-in Microphone input Headphone output
<b>AC Adapter</b>	
Input	AC 120/230 V (50/60 Hz)
<b>Input</b>	
Type	Keyboard, touchpad
Features	Built-in numeric keyboard
<b>Audio &amp; Video</b>	
Compliant Standards	High Definition Audio
Audio Features	Acer 3DSonic stereo speakers
Camera	Integrated webcam
Sound	Stereo speakers , microphone
Graphics Processor	NVIDIA GeForce G105M - 512 MB
<b>Processor / Chipset</b>	
Front Side Bus	800 MHz
64-bit Computing	Yes
Cache	L2 - 1 MB
Number of Cores	Dual-Core
Features	Intel 64 Technology
Chipset	Mobile Intel GL40 Express
CPU	Intel Pentium T4400 / 2.2 GHz
<b>Environmental Standards</b>	
ENERGY STAR Qualified	Yes
<b>Dimensions &amp; Weight</b>	
Width	37 cm
Height	3.5 cm
Weight	2.5 kg
Depth	24.3 cm

<b>Communications</b>	
Network Interface	Gigabit Ethernet
Features	Acer SignalUp
Wireless Controller	Acer InviLink Nplify
Remote Management Protocol	DMI 2.0, ASF 2.0
Wireless	802.11b/g/n (draft)
<b>Battery</b>	
Technology	6-cell Lithium Ion
Run Time	Up to 2 hours
<b>Display</b>	
Widescreen	Yes
Type	15.6"
Colour Support	16.7 million colours
LCD Backlight Technology	LED backlight
Resolution	1366 x 768 (HD)
<b>Software</b>	
Microsoft Office Preloaded	Includes a pre-loaded image of select Microsoft Office 2010 suites. Purchase an Office 2010 Product Key Card or disc to activate preloaded software on this PC.
Software Included	Adobe Flash Player, Acer Recovery Management, Acer GridVista, Adobe Reader, NTI Media Maker, Corel WinDVD, McAfee Internet Security Suite (60 days trial)
<b>Miscellaneous</b>	
Features	Security lock slot (cable lock sold separately), administrator password, system password, Disc Anti-Shock Protection System (DASP, wake on LAN
Compliant Standards	ACPI 3.0
<b>Storage</b>	
Read Speed	24x (CD) / 8x (DVD)
Write Speed	24x (CD) / 8x (DVD±R) / 4x (DVD±R DL)
CD / DVD Rewrite Speed	16x (CD) / 6x (DVD-RW) / 8x (DVD+RW) / 5x (DVD-RAM)
Optical Drive	DVD±RW (±R DL) / DVD-RAM - fixed
Main Storage	500 GB HDD
Interface	SATA 1.5 Gb/s
<b>Manufacturer Warranty</b>	
Service & Support	1 year warranty
Service & Support Details	Limited warranty - 1 year

Memory	
Slots Qty	2
Empty Slots	0
Max RAM Supported	4 GB
Speed	1066 MHz
Technology	DDR3 SDRAM
Form Factor	SO DIMM 204-pin
RAM	3 GB (1 x 1 GB + 1 x 2 GB)
General	
Product Type	Notebook
Operating System	Microsoft Windows 7 Home Premium 64-bit Edition



# PLANOS



**Plano 1. Planta falsos techos (Baja, 1ª, 2ª y 3ª).**

**Plano 2. Planta falsos techos (4ª, 5ª, 6ª y 7ª).**

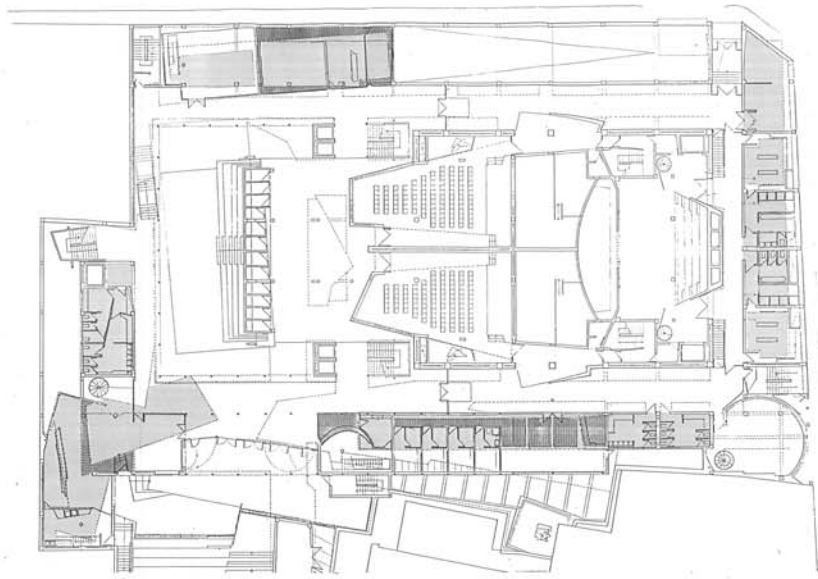
**Plano 3. Acotado Planta Baja.**

**Plano 4. Acotado Planta 2ª.**

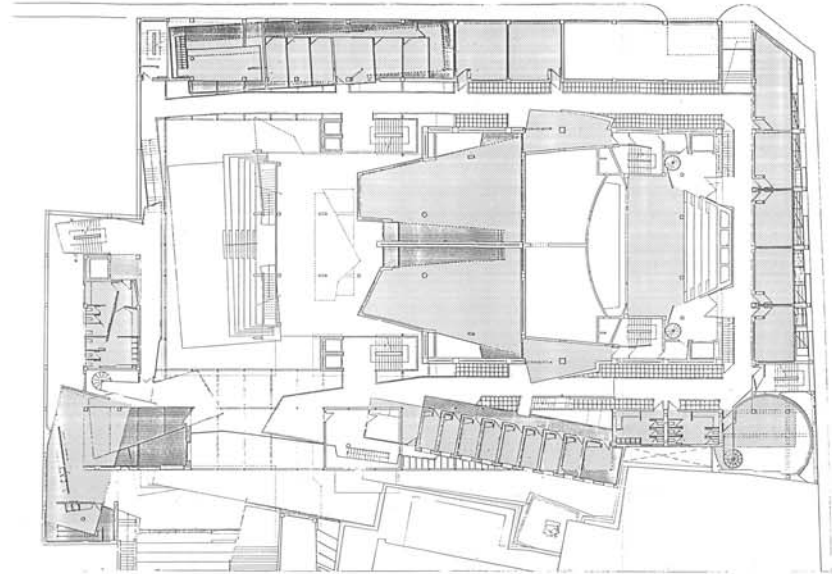
**Plano 5. Alzado Calle General Bravo. Sección falsa fachada.**

**Plano 6. Secciones.**

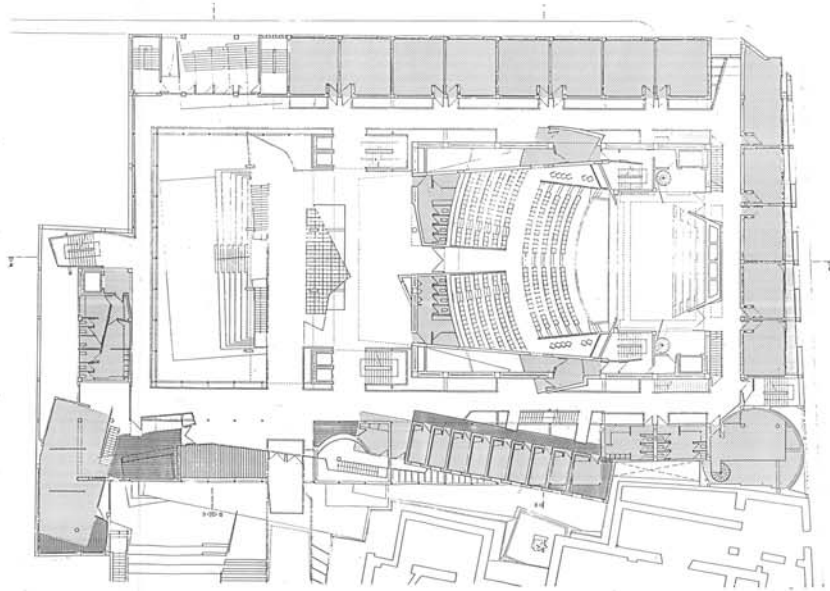




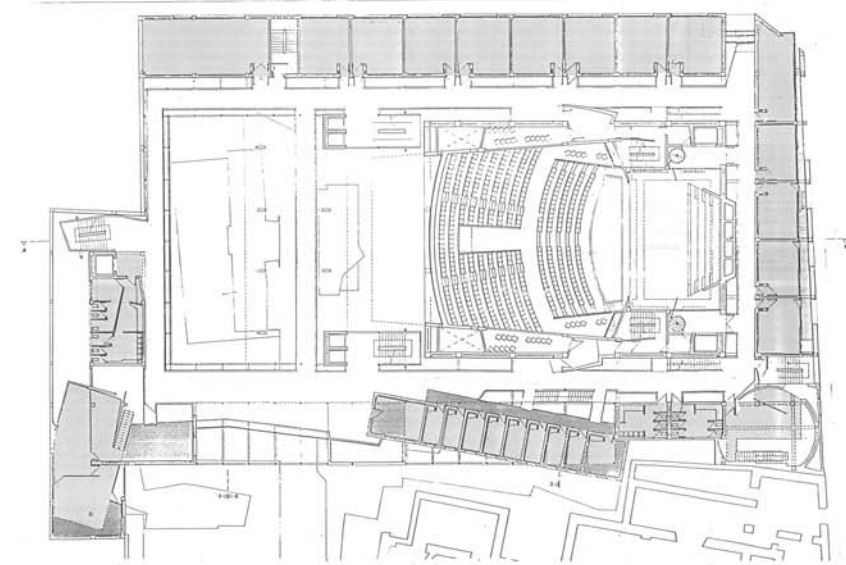
PLANTA BAJA



PLANTA 1ª



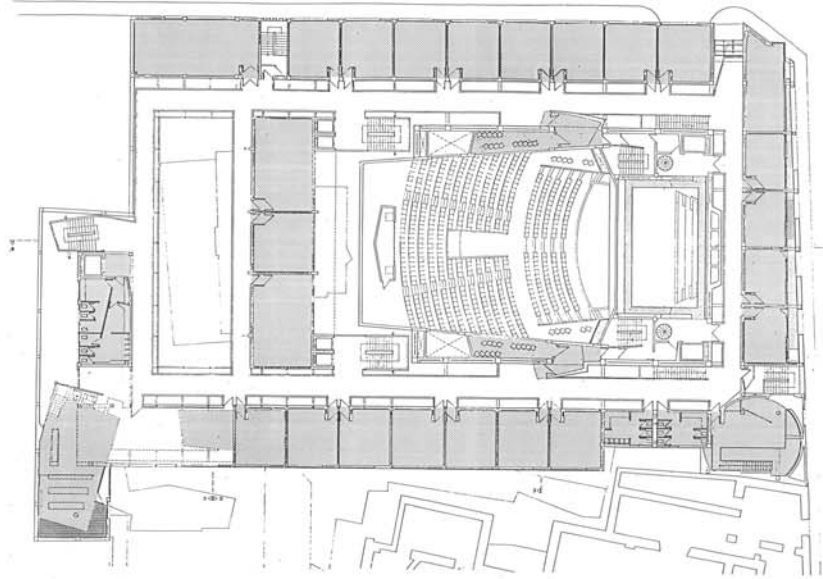
PLANTA 2ª



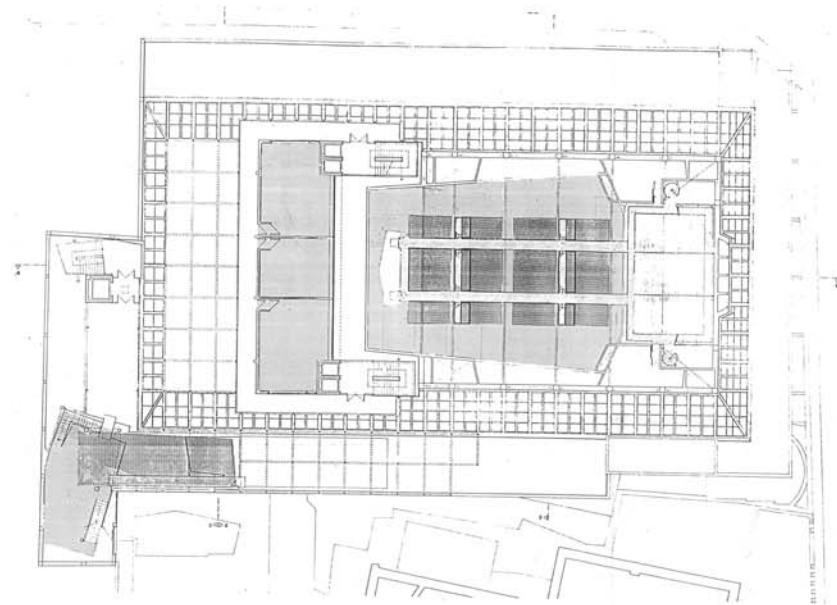
PLANTA 3ª



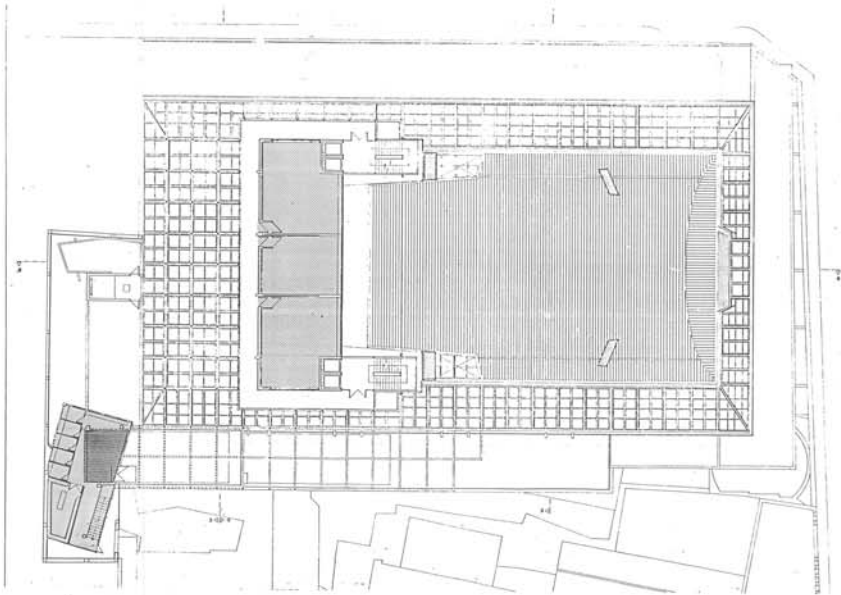
PROPIETARIO: EXCMO. AYUNTAMIENTO DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
 TITULO DEL PLANO: PLANTA FALDAS TECHOS (BAJA, 1ª, 2ª Y 3ª)  
 JUNIO 1984  
 ARQUITECTO: FELIX JUAN BORDES CADALERO  
 INGENIERO DE OBRAS DE ARQUITECTURA DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
 COLABORADORES: ALBERTO BRAVO DE LACOMA BERRIO, ESCALA: 1:200  
 JUAN LUIS WOLFFEN VOYON, N.º PLANO: 36



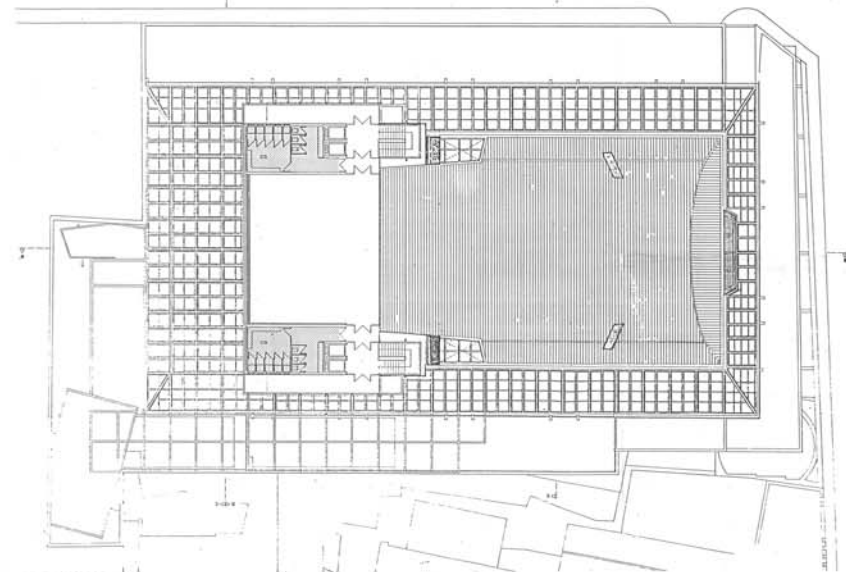
PLANTA 4ª



PLANTA 5ª



PLANTA 6ª

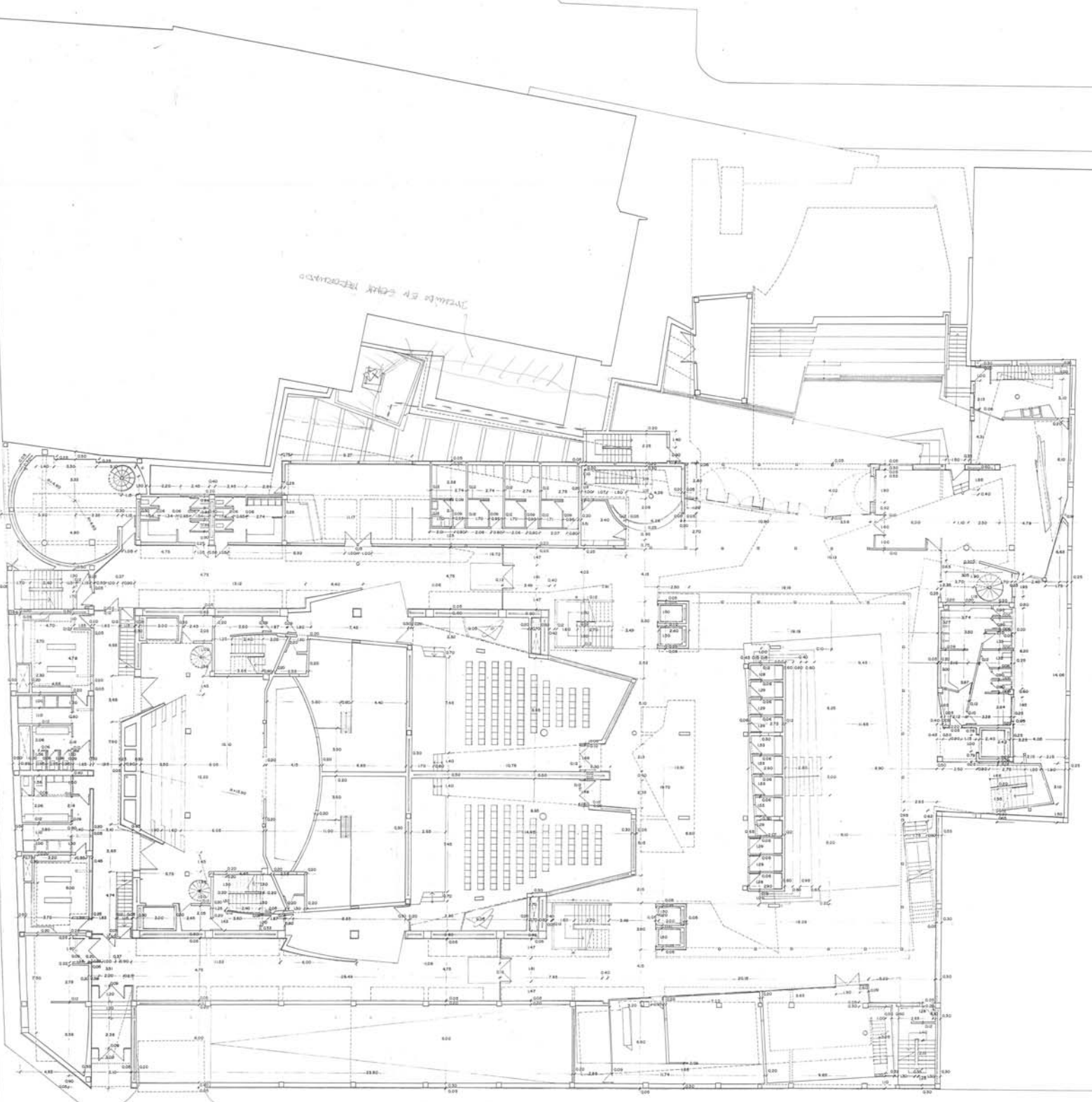


PLANTA 7ª

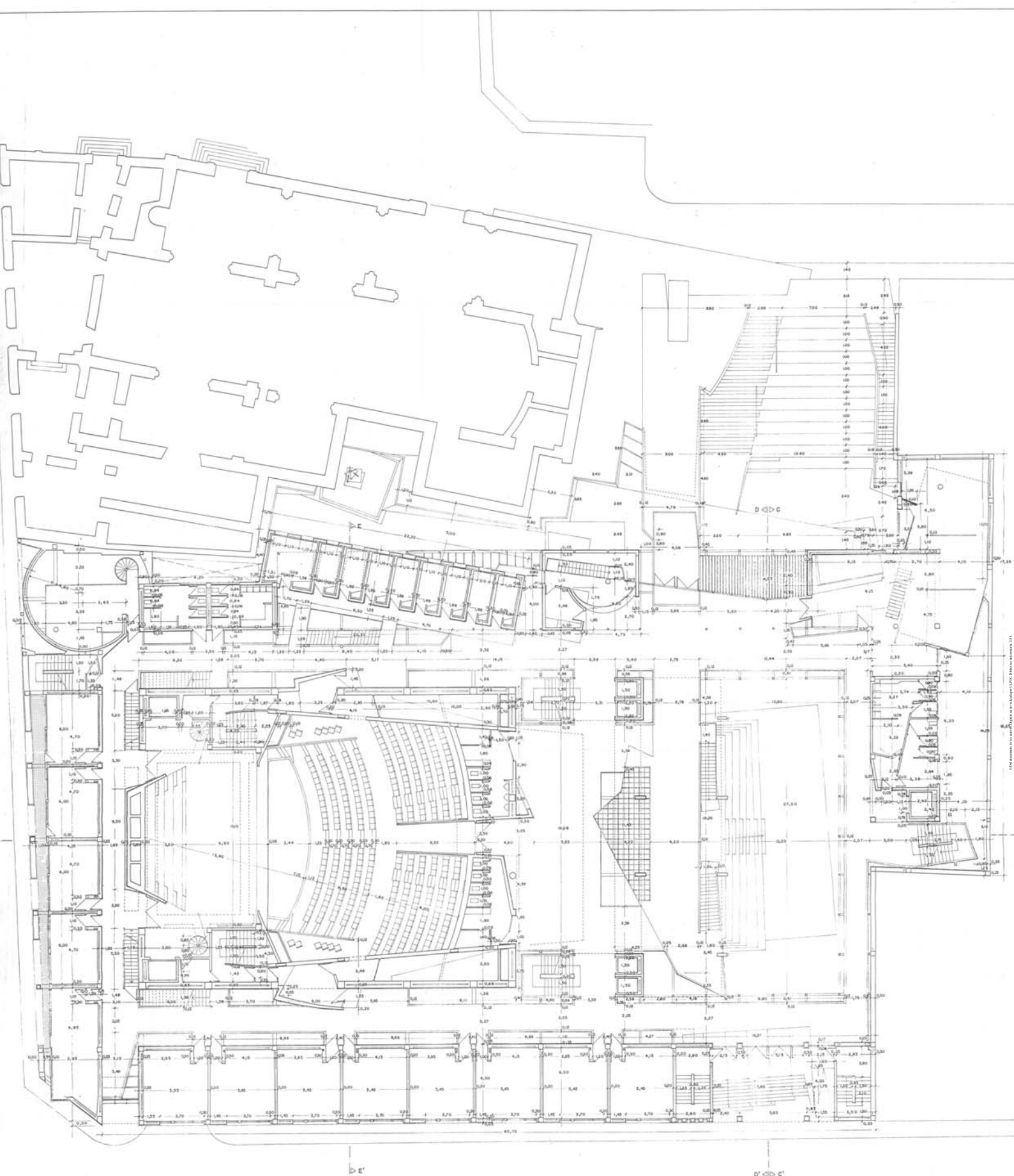
	PROYECTO: EXCMO. AYUNTAMIENTO DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.
	URBANISMO DE PLANTA FALSO TECHO (BAJA, 4ª, 5ª, 6ª Y 7ª).
PROYECTADO POR: FÉLIX JUAN BORDES CABALLERO INGENIERO DE OBRAS Y CALIFICADO EN OBRAS DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	ESCALA: 1:200
PROYECTADO POR: ALBERTO BRAVO DE LAS CASAS GÓMEZ INGENIERO DE OBRAS Y CALIFICADO EN OBRAS DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	N.º PLANO: 37

COPIA AUTORIZADA POR EL AYUNTAMIENTO DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

INSTRUMENTO EN CARTA REDUCIDA

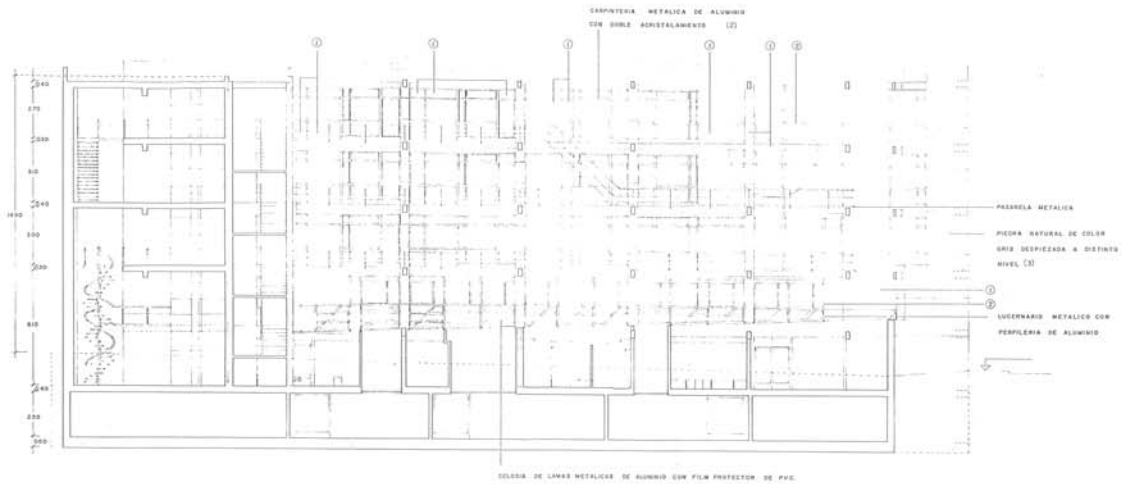


	PROPIEDAD: EXCMO. AYUNTAMIENTO DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.
	TITULO DEL PLANO: ACOTADO PLANTA BAJA
MODIFICADO Nº 1	ARQUITECTO: FELIX JUAN BORDÉS CABALLERO
CONSERVATORIO SUPERIOR DE MUSICA	PROYECTO: ALBERTO BRAVO DE LAGUNA ESCOBAR
LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	CONSEJEROS: ALBERTO BRAVO DE LAGUNA ESCOBAR, JUAN LUIS MONZÓN VERA.

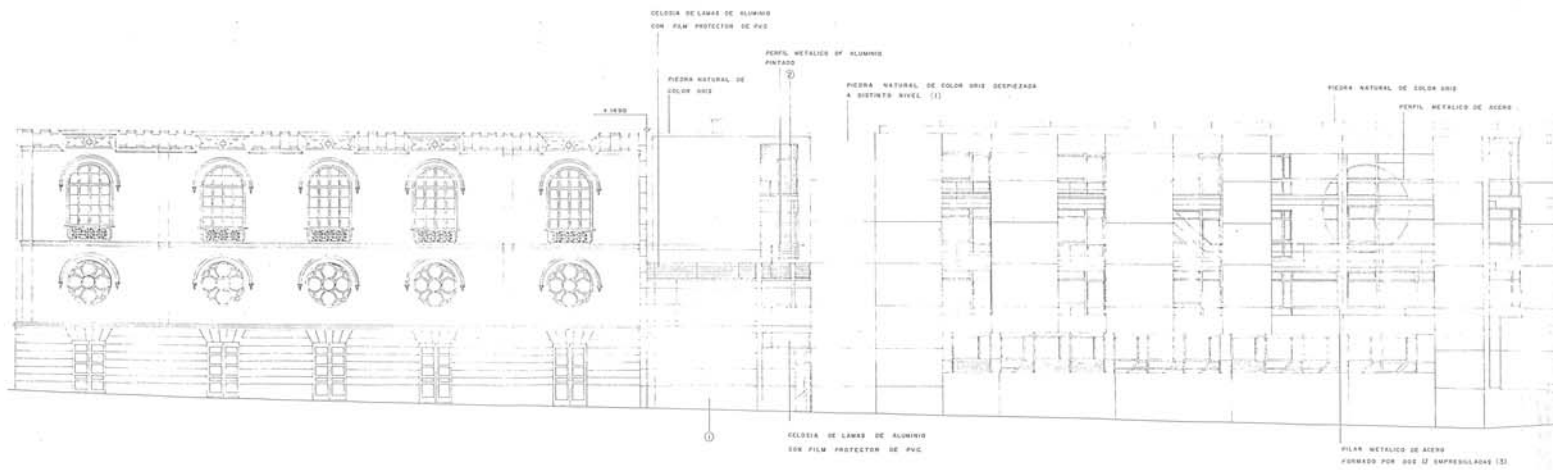



 PROYECTADO EXCMO. AYUNTAMIENTO DE  
 LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.  
 TITULO DEL PLANO ACOTADO PLANTA 2a.  
 ARQUITECTO FELIX JUAN BORDES CABALLERO  
 DE BORDES  
 ARQUITECTO COLABORADOR ALBERTO BRANG DE LAJUNTA ESCOBAR  
 LAS PALMAS DE GRAN CANARIA





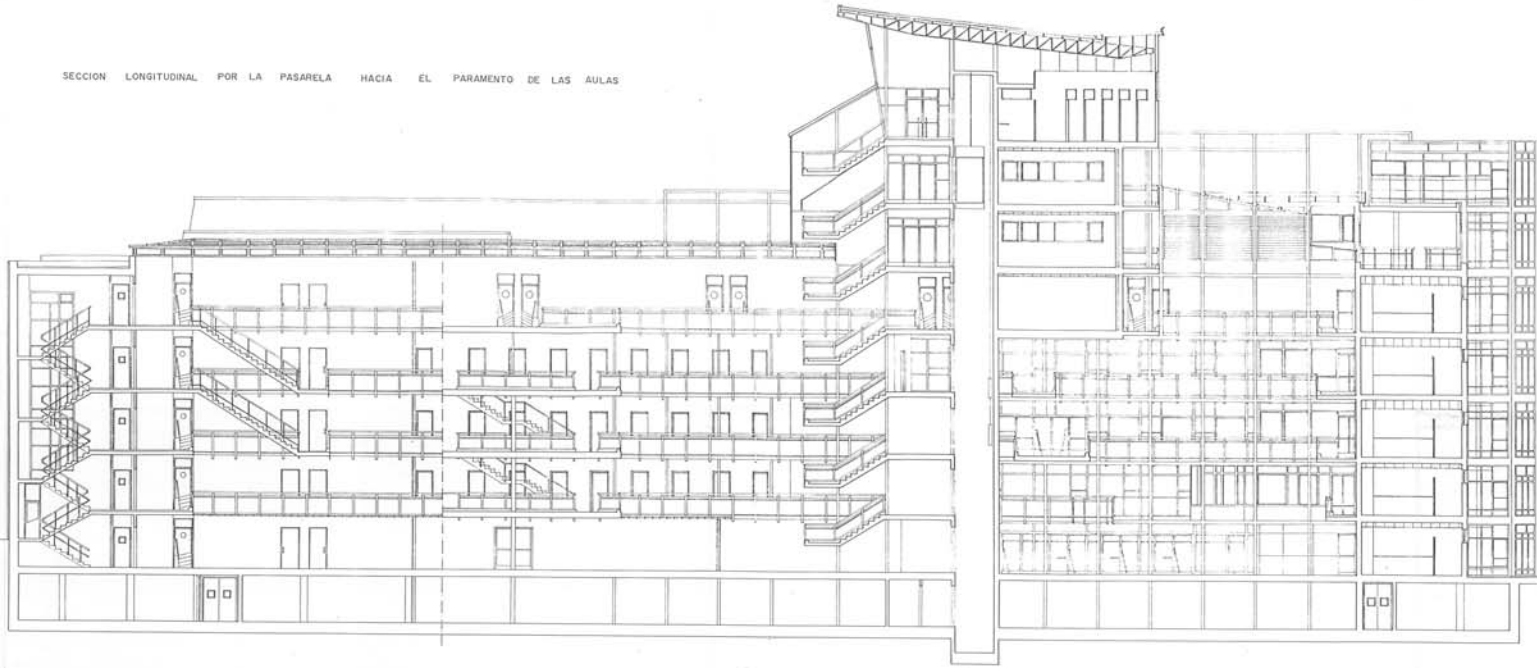
ALZADO SECCION POR FALSA FACHADA  
A LA CALLE GRAL. BRAVO



ALZADO A LA CALLE GRAL. BRAVO

	PROPIETARIO: EXCMO. AYUNTAMIENTO DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.
	TITULO: PLAN ALZADO C/GRAL. BRAVO. SECCION FALSA FACHADA JOSÉ-LUIS
ARQUITECTO: FELIX JUAN BORDES CABALLERO INGENIERO DE OBRAS C/LOS ANJOS 222 - F. LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	ARQUITECTO COLABORADOR: ALBERTO BRUNO DE LAGUNA GARCIA JUAN LUIS MONZÓN VERA
MINISTERIO DE F. O. M. COMISIÓN TÉCNICA DE OBRAS DE RECONSTRUCCIÓN DE GRAN CANARIA DE MONZA, LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	C/GRAL. 11103 10. JUNIO 1973

SECCION LONGITUDINAL POR LA PASARELA HACIA EL PARAMENTO DE LAS AULAS



SECCION TRANSVERSAL POR LA SALA HACIA LA BOCA DEL ESCENARIO


	PROPIEDAD: EXCMO. AYUNTAMIENTO DE	FECHA: 1-2-64
	LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	
TITULO: SOL. PL. MO.	SECCIONES	
MODIFICADO EN: CONSERVACION SUPERIOR DE MEDIDA LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	ARQUITECTO: FELIX JUAN BORDES CABALLERO C/BOCA DEL ESCENARIO, 27. LAS PALMAS DE GR.	
	ARQUITECTOS COLABORADORES: ALBERTO RAMOS DE CALZADA VOTERO JUAN LUIS MONZON VIGARA	ESCALA: 1:100 W. PL. MO. 18/64

Foto tomada a través de la ventana del edificio de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria