

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**SONORIZACIÓN DE ESTACIONES
SUBTERRÁNEAS BASADA EN TECNOLOGÍA
DE MEGAFONÍA DIRECTIVA**

- PROYECTO FIN DE CARRERA -

Alejandro Escolar Pabón

Noviembre 2008

**SONORIZACIÓN DE ESTACIONES SUBTERRÁNEAS
BASADA EN TECNOLOGÍA DE MEGAFONÍA
DIRECTIVA**

**AUTOR: Alejandro Escolar Pabón
TUTOR: José Manuel Goberna Ruiz Poveda**

**Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Noviembre 2008**

Resumen:

En este proyecto se ha realizado un análisis para diseñar e instalar una solución de sonorización para los andenes de una estación subterránea de reciente construcción de un operador de transporte suburbano de Madrid.

Para comenzar se presentan los principales parámetros acústicos y electroacústicos que caracterizan la acústica de un recinto y que han de ser analizados para la sonorización del mismo. Junto con los parámetros básicos se plantean las necesidades del cliente en la sonorización del recinto (andenes de la estación) así como los problemas que conllevan estas necesidades.

A continuación se ha analizado la solución inicial de megafonía con la que cuenta la estación teniendo en cuenta los parámetros presentados previamente. Este análisis se realiza con una herramienta software profesional de análisis de recintos acústicos.

Además del análisis de la solución existente en la estación, se ha llevado a cabo un estudio de las diferentes soluciones técnicas y alternativas de mercado para realizar una óptima sonorización. El objetivo es encontrar la mejor solución técnica que cumpla con los requisitos de calidad exigidos por el cliente.

Una vez realizados todos los estudios se propone al cliente una solución y tras su aceptación se procede a realizar la instalación del sistema en la estación objeto del proyecto.

Abstract:

In this project we made an analysis of a sound solution of the platforms of a recent construction underground station from a transport operator located in Madrid.

We introduce the main acoustic and electroacoustic parameters that characterize and have to be analysed for the correct sound of that precinct. We also introduce our client demands and problems with the sound system of this station. Using those parameters, the traditional sound system used in the station is analysed with a professional software tool for analyzing acoustic precincts.

In addition to the analysis of the previous sound system in the station, we studied the different technical solutions and market alternatives to provide an optimum sound system. The aim is to find the best solution that matches with the client quality requirements.

Once we have all the studies made we suggest the client the best solution and when it is accepted we proceed to install the sound system in the station.

Palabras clave:

Directividad, STI (Speech Transmission Index), RaSTI (Rapid Speech Transmission Index), %ALcons (Percentage Articulation Loss of Consonants), DSP (Digital Signal Processor), CAG (Control Automático de Ganancia)

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi ponente, Doroteo Torre Toledano, por darme la oportunidad de realizar este proyecto.

Para la realización de este proyecto he contado con la ayuda de los miembros de la línea de Seguridad y Control de la empresa Dominion. Gracias a todos ellos, en especial a mi tutor Jose Manuel Goberna. Gracias también a Edu un excelente compañero durante la realización del proyecto y ahora un buen amigo.

Agradezco de manera muy especial a mis amigos de la universidad, sin ninguna duda lo mejor que me llevo de mi etapa universitaria. Todos ellos han estado siempre conmigo, compartiendo los buenos momentos y apoyándome en los menos buenos. Gracias a: David, Dupa, Ele, Eva, Gonzalo, Jual, Lalo, Nando, Raky, Richi, Suizo, Tato y Tostao. Es un orgullo haber estudiado con ellos, dudo que existan mejores compañeros. También quiero agradecer a Anita por ayudarme a darle ‘el toque’ a este proyecto.

A mis amigos de fuera de la universidad, gracias a ellos estos años han estado llenos de incontables buenos momentos. Gracias Héctor, Kuman, Pochin, Sergio, Dani y Laura. En especial gracias a David, compañero de todo.

A Lis por ser mi punto de apoyo en cualquier circunstancia y a pesar de que los trabajos, prácticas, clases y exámenes robaban mucho de ‘su’ tiempo, estaba siempre ahí. Gracias peque!

Gracias a las personas más importantes en mi vida: mi familia. A mis tíos Emilio, Conchita, Juan y Maribel por sus ánimos en todo momento. A mis primas Paula y Mireia por compartir conmigo experiencias de las que siempre he aprendido. A mi primo y ahijado Juancho, su confianza en mí me exigía un punto extra de esfuerzo, clave en muchas ocasiones. A mi abuela, por preocuparse continuamente por mí y por rezar en todos mis exámenes; estoy seguro de que más de uno de ellos lo he aprobado gracias a algún santo!

A mi madre y a mi hermana, les doy gracias por estar día a día a mi lado incansablemente. Por darme los mejores consejos y todo su cariño. Todo lo que he agradecido antes me lo han dado ellas multiplicado por infinito.

Por último, agradezco a mi padre todas las lecciones de vida que me ha legado, porque soy como soy gracias a él, él me enseñó a no rendirme nunca, a aspirar a lo más alto siempre, a esforzarme por conseguir todo lo que me haya propuesto, y a ver siempre el lado positivo de las cosas...Gracias por darme tanta fuerza. Gracias papá.

Índice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introducción | 7 |
| 1.1 | Motivación | 7 |
| 1.2 | Objetivos | 7 |
| 2 | Estudio del estado del arte | 9 |
| 2.1 | Definición de parámetros acústicos | 9 |
| 2.1.1 | Nivel de presión sonora (SPL) | 9 |
| 2.1.2 | Relación señal / ruido | 11 |
| 2.1.3 | Tiempo de reverberación | 12 |
| 2.1.4 | Distancia crítica | 14 |
| 2.1.5 | Respuesta en frecuencia del altavoz | 15 |
| 2.1.6 | Saturación | 16 |
| 2.2 | Bases psicoacústicas | 16 |
| 2.2.1 | Periodo de integración de Haas | 17 |
| 2.2.2 | Efecto de precedencia | 17 |
| 2.2.3 | Ecos tardíos | 19 |
| 2.3 | Parámetros de evaluación | 20 |
| 2.3.1 | STI (Speech Transmission Index) | 21 |
| 2.3.2 | RASTI (Rapid Speech Transmission Index) | 22 |
| 2.3.3 | %ALcons (Pérdidas de articulación de la palabra) | 24 |
| 3 | Diseño y desarrollo | 26 |
| 3.1 | Descripción del recinto | 26 |
| 3.2 | Software de análisis EASE | 27 |
| 3.3 | Caracterización del recinto | 29 |
| 4 | Pruebas y resultados: megafonía clásica | 35 |
| 4.1 | Características sistema distribuido | 35 |
| 4.2 | Análisis del punto sonoro | 37 |
| 4.3 | Análisis mediante software EASE de megafonía distribuida | 42 |
| 4.3.1 | RaSTI | 43 |
| 4.3.2 | ALcons | 45 |
| 4.3.3 | SPL directo | 47 |
| 5 | Pruebas y resultados: megafonía directiva | 49 |
| 5.1 | Altavoces directivos | 49 |
| 5.1.1 | ICONYX IC Series de Renkus-Heinz | 49 |
| 5.1.2 | Tecnología | 53 |
| 5.1.3 | Software Beamware | 58 |
| 5.2 | Análisis mediante software EASE de megafonía directiva | 60 |
| 5.2.1 | RaSTI | 61 |
| 5.2.2 | ALcons | 63 |
| 5.2.3 | SPL directo | 65 |
| 6 | Conclusiones del estudio de ambas megafonías | 67 |
| 6.1 | Solución propuesta | 68 |
| 6.1.1 | Esquema de la propuesta | 68 |
| 6.2 | Trabajo futuro | 75 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 7 | <i>Bibliografía</i> | 76 |
| 8 | <i>Anexo A – El decibelio (dB)</i> | 77 |
| 9 | <i>Anexo B - Metodología de trabajo</i> | 79 |
| 9.1 | Criterios generales | 79 |
| 9.2 | Planificación | 80 |
| 9.2.1 | Definición hardware | 81 |
| 9.2.2 | Planificación de pedidos | 81 |
| 9.2.3 | Plan de seguimiento y de control del proyecto | 81 |
| 9.2.4 | Plan de ejecución | 81 |
| 9.2.5 | Plan de formación | 82 |
| 9.2.6 | Plan de documentación | 82 |
| 10 | <i>Anexo C – Informes para el seguimiento del proyecto</i> | 83 |
| 10.1 | Dimensionamiento del sistema | 83 |
| 10.2 | Funcionamiento | 84 |
| 10.3 | Conexión con sistemas externos | 85 |
| 10.4 | Verificación de índices acústicos | 85 |
| 10.5 | Detección de averías | 86 |
| 10.6 | Cableado e instalación | 87 |
| 10.7 | Documentación | 88 |
| 10.8 | Documento de requisitos | 89 |
| 10.9 | Informe de seguimiento | 90 |
| 10.10 | Informe de seguridad | 91 |
| 11 | <i>Anexo D – Presupuesto</i> | 92 |
| 12 | <i>Anexo E – Pliego de condiciones</i> | 93 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Bandas de octava para el cálculo del STI..... | 22 |
| Tabla 2 Frecuencias de modulación para el cálculo del STI..... | 22 |
| Tabla 3 Interpretación de valores STI / RASTI..... | 24 |
| Tabla 4 Interpretación de valores de %ALcons..... | 25 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Curvas de Fletcher y Munson. Muestran la relación existente entre la frecuencia y la intensidad de dos sonidos para que éstos sean percibidos como igual de fuertes | 10 |
| Figura 2 Curvas de ponderación A, B y C..... | 11 |
| Figura 3 Diagrama que muestra la caída del sonido en los oídos de los oyentes..... | 12 |
| Figura 4 Trayectorias del sonido directo radiado por el violín y de las primeras reflexiones debidas a esta radiación | 13 |
| Figura 5 Evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente sonora normalizada con respecto a la distancia crítica D_c | 15 |
| Figura 6 Respuesta en frecuencia de la señal emitida por un altavoz. Permite conocer la intensidad sonora proporcionada por el dispositivo para las frecuencias que debe reproducir..... | 16 |
| Figura 7 Incremento de nivel (en dB) de fuente tardía respecto a precedente en función del retardo (en ms)..... | 18 |
| Figura 8 Ejemplo de una sonorización donde el altavoz es la fuente más cercana al oyente y queremos que la procedencia sea la de la posición del locutor..... | 19 |
| Figura 9 Criterio de Doak & Bolt para ecos. La curva mostrada asegura que con valores por debajo de ella, se obtienen ecos no molestos para más del 90% de las personas | 20 |
| Figura 10 Resumen de frecuencias de modulación y bandas de octava en método RASTI | 23 |
| Figura 11 Fotografías de los andenes a sonorizar..... | 27 |
| Figura 12 Vista general del modelado para la estación | 28 |
| Figura 13 Vista de perfil (izquierda), planta (centro), frontal (derecha) | 28 |
| Figura 14 Vista general de los dos andenes..... | 28 |
| Figura 15 Tiempo de reverberación..... | 30 |
| Figura 16 Ruido sin tren en la estación | 31 |
| Figura 17 Ruido con tren en la estación | 32 |
| Figura 18 Coeficiente de absorción de los paneles de Vítrex..... | 33 |
| Figura 19 Coeficiente de absorción del terrazo | 33 |
| Figura 20 Coeficiente de absorción del hormigón..... | 34 |
| Figura 21 Colocación de altavoces de pared en un sistema distribuido | 35 |
| Figura 22 Colocación de altavoces de techo en un sistema distribuido | 36 |
| Figura 23 Vista gráfica de los parámetros altura del techo (h), alcance horizontal (r) y altura de la audiencia (l) | 36 |
| Figura 24 Rejilla tipo cuadrada borde con borde para conseguir sonorizaciones distribuidas con una cobertura sonora homogénea..... | 37 |
| Figura 25 Proyector bidireccional usado en megafonía tradicional. El lado oculto del proyector es idéntico al que se observa en la fotografía..... | 38 |
| Figura 26 Respuesta en frecuencia de proyector bidireccional | 38 |
| Figura 27 Esquema de solución con proyectores bidireccionales | 39 |
| Figura 28 Cancelación de señal | 40 |
| Figura 29 Estructura general de un filtro peine | 41 |
| Figura 30 Magnitud de la respuesta en frecuencia para distintos valores de α | 41 |
| Figura 31 Vista general de la simulación de los andenes con un sistema distribuido.... | 42 |
| Figura 32 Vista frontal de la simulación de los andenes con un sistema distribuido.... | 43 |
| Figura 33 Nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (sin tren en la estación) | 44 |
| Figura 34 Histograma del nivel de inteligibilidad (sin tren en la estación)..... | 44 |
| Figura 35 Nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (con tren en la estación).... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 36 Histograma del nivel de inteligibilidad (con tren en la estación)..... | 45 |
| Figura 37 Nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)..... | 46 |
| Figura 38 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)..... | 46 |
| Figura 39 Nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)..... | 47 |
| Figura 40 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)..... | 47 |
| Figura 41 SPL directo en la estación por zonas..... | 48 |
| Figura 42 Histograma del SPL directo en la estación por zonas..... | 48 |
| Figura 43 Transductor de la columna Iconyx..... | 49 |
| Figura 44 Comparación de diagramas polares de un transductor convencional y uno de la columna Iconyx..... | 50 |
| Figura 45 Módulo amplificador/procesador de columnas Iconyx..... | 51 |
| Figura 46 Módulo básico IC8..... | 51 |
| Figura 47 Detalle de la modularidad de las columnas Iconyx..... | 52 |
| Figura 48 Directividad de la columna en función de la longitud de la misma..... | 54 |
| Figura 49 Efecto de la separación entre transductores en la directividad de la columna..... | 55 |
| Figura 50 Representación gráfica de la longitud de la columna y separación entre transductores. El espaciamiento de transductores representa el límite de las altas frecuencias y la altura de la columna el límite de las bajas frecuencias tal y como se explica en este apartado..... | 56 |
| Figura 51 Efecto de diferentes retardos sobre la señal original..... | 57 |
| Figura 52 Ángulo del haz acústico..... | 58 |
| Figura 53 Pantalla del software Beamware donde se deben introducir los parámetros..... | 59 |
| Figura 54 Mapa de SPL calculado con el software Beamware..... | 60 |
| Figura 55 Detalle de la ubicación de las columnas en el andén..... | 61 |
| Figura 56 Aspecto de la simulación del recinto a simular..... | 61 |
| Figura 57 Nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (sin tren en la estación)..... | 62 |
| Figura 58 Histograma del nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (sin tren en la estación)..... | 62 |
| Figura 59 Nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (con tren en la estación)..... | 63 |
| Figura 60 Histograma del nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (con tren en la estación)..... | 63 |
| Figura 61 Nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)..... | 64 |
| Figura 62 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)..... | 64 |
| Figura 63 Nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)..... | 65 |
| Figura 64 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)..... | 65 |
| Figura 65 Nivel de SPL directo en la estación por zonas..... | 66 |
| Figura 66 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas..... | 66 |
| Figura 67 Esquema de la solución propuesta..... | 69 |
| Figura 68 Oyentes en el área de sonorización..... | 70 |
| Figura 69 Imagen de sonda microfónica a utilizar en este proyecto..... | 72 |
| Figura 70 Imagen del cuarto de comunicaciones de la estación..... | 72 |
| Figura 71 Detalle de la matriz de audio y las etapas de potencia del rack de megafonía..... | 73 |
| Figura 72 Imagen del distribuidor de audio..... | 74 |
| Figura 73 Imagen del procesador de audio..... | 74 |
| Figura 74 Imagen del reproductor de CDs..... | 74 |
| Figura 75 Imagen del micrófono inalámbrico..... | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 76 Valor en Wattios y en dB..... | 77 |
| Figura 77 Esquema de la metodología de trabajo..... | 80 |

1 Introducción

1.1 Motivación

La megafonía es uno de los aspectos más importantes en una estación subterránea por dos motivos fundamentales, por seguridad y por información.

Los sistemas de megafonía juegan un papel muy importante en cualquier tipo de instalación ya que suponen un elemento fundamental en lo referente a cuestiones de seguridad. Ante una situación de emergencia, la vida de un gran número de personas puede depender de las indicaciones que se den puedan darse a través de este sistema.

Casos no tan drásticos pero que ocurren con frecuencia en el entorno ferroviario son los avisos de avería en alguna de las líneas. Aunque de su comprensión no depende la vida de nadie, sí que afectan al bienestar de cientos de personas, cuya correcta interpretación resulta de mucha utilidad para los viajeros.

Es importante por tanto encontrar una solución de megafonía óptima que garantice que el sistema vaya a cumplir su finalidad última: comunicar el contenido de mensajes sonoros al público. De nada sirve un sistema de megafonía que emita mensajes ininteligibles para la audiencia.

El éxito de una buena sonorización de un recinto depende de dos factores igualmente importantes: el acondicionamiento acústico del recinto y el propio sistema de megafonía.

Mediante un acondicionamiento acústico adecuado del recinto a sonorizar conseguiremos confort acústico en la estancia y tiempos de reverberación adecuados que hagan posible la comprensión del mensaje reproducido. A su vez pueden eliminarse mediante tratamientos de este tipo, posibles ecos molestos críticos en cuanto a su efecto nocivo en la inteligibilidad de la palabra.

El otro factor clave de una buena sonorización es el sistema de megafonía en sí mismo. En estos sistemas son importantes todos los elementos que los constituyen (amplificadores, micrófonos, altavoces...) ya que el elemento de más baja calidad será el que marque la calidad del sistema en su totalidad. Es importante también la correcta elección de los puntos sonoros, ya no tanto por la calidad de los mismos y su potencia de radiación, sino por una solución de refuerzo sonoro óptima para cada tipo de recinto.

1.2 Objetivos

Nuestro objetivo es diseñar una adecuada solución de sonorización para una estación subterránea que cumpla con los cuatro requerimientos básicos que ha de reunir todo sistema de megafonía para garantizar el cumplimiento de la funcionalidad que se le suponen, es decir, que el mensaje reproducido a través de él sea comprensible para los potenciales oyentes. Estos cuatro requerimientos son los siguientes:

Nivel suficiente en el área de audiencia: Se considera un nivel suficiente en el área de audiencia cuando el nivel de presión sonora, concepto analizado en detalle en el siguiente capítulo, radiado por el sistema es superior al nivel de ruido de fondo en al menos 10 dB para situaciones continuas de ruido, es decir, que la relación señal/ruido (relación S/N) sea en todo momento mayor de 10 dB, siendo aconsejable que esta sobrepase los 15 dB.

Fidelidad en la señal reproducida: La fidelidad en la señal reproducida dependerá de parámetros del sistema tales como respuesta en frecuencia de los altavoces, relación señal/ruido de todo el sistema, baja distorsión en amplificadores, etc. Todos los elementos de la cadena en un sistema de megafonía son importantes en este aspecto ya que la calidad de la señal reproducida la marcará el equipo de peor calidad del sistema.

De nada sirve contar con un buen sistema en cuanto a procesado de señal, etapas de potencia, microfonía, etc... Si contamos con unos altavoces de mala respuesta en frecuencia; del mismo modo, podemos tener en nuestro sistema unos altavoces excepcionales y la etapa de potencia introducir ruido a la señal de audio a reproducir.

Suficiente inteligibilidad: En un sistema de megafonía es imprescindible que los mensajes emitidos sean entendidos por las personas destinatarias de los mismos. Para evaluar la medida en la que este requisito se cumple existen diversos parámetros indicativos del nivel de inteligibilidad que proporciona un sistema de sonorización en un determinado recinto. Estos parámetros serán descritos y analizados más adelante.

Uniformidad en el recubrimiento sonoro: El objetivo es conseguir un nivel uniforme de presión sonora a lo largo de toda el área de audiencia. Idealmente, las variaciones máximas de nivel de presión sonora a lo largo del área a sonorizar no deben de ser mayores a 3 dB. De esta manera, una persona que camine por el área de audiencia no percibirá diferencias de volumen en su paseo. Es importante que no haya ninguna sombra acústica en dicha área, ya que una persona ha de poder entender el mensaje emitido desde cualquier lugar donde se encuentre.

2 Estudio del estado del arte

2.1 Definición de parámetros acústicos

Los parámetros que presentamos a continuación serán de gran utilidad a la hora de caracterizar un recinto desde el punto de vista acústico.

La característica común de los parámetros de este apartado es que todos ellos pueden ser calculados a partir de medidas físicas mediante ecuaciones matemáticas más o menos complejas. Es decir, hay un método de valoración de cada parámetro objetivo, que no depende de la subjetividad del oyente.

2.1.1 Nivel de presión sonora (SPL)

La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. El nivel de presión sonora determina la intensidad del sonido que genera una presión sonora instantánea (es decir, del sonido que alcanza a una persona en un momento dado) y varía entre 0 dB umbral de audición y 120 dB umbral de dolor.

El hecho de que la relación entre la presión sonora del sonido más intenso (cuando la sensación de sonido pasa a ser de dolor auditivo) y la del sonido más débil sea de alrededor de 10^6 (las presiones sonoras audibles varían entre los 20 μPa y los 20 Pa) ha llevado a adoptar una escala comprimida denominada escala logarítmica. Llamando P_{ref} (presión de referencia a la presión de un tono apenas audible (es decir 20 μPa) y P al valor eficaz de la presión sonora medida, podemos definir el **nivel de presión sonora L_p** como:

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_{\text{ref}}} \text{ (dB)}$$

El empleo de la referencia P_{ref} tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores de L_p positivos. La unidad utilizada para expresar el nivel de presión sonora es el decibel (dB). Los sonidos de más de 120 dB pueden causar daños auditivos inmediatos e irreversibles, además de ser bastante dolorosos para la mayoría de las personas.

El nivel de presión sonora tiene la ventaja de ser una medida objetiva y bastante cómoda de la intensidad del sonido, pero tiene la desventaja de que está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe. Esto se debe a que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia. En efecto, mientras que un sonido de 1 KHz ya es audible a 0 dB, es necesario llegar a los 37 dB para poder escuchar un tono de 100 Hz, y lo mismo es válido para sonidos de más de 16 KHz.

Cuando esta dependencia de la frecuencia de la sensación de sonoridad fue descubierta y medida (por Fletcher y Munson, en 1933, ver figura 1), se pensaba que utilizando una red de filtrado (o ponderación de frecuencia) adecuada sería posible medir esa sensación

de forma objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas.

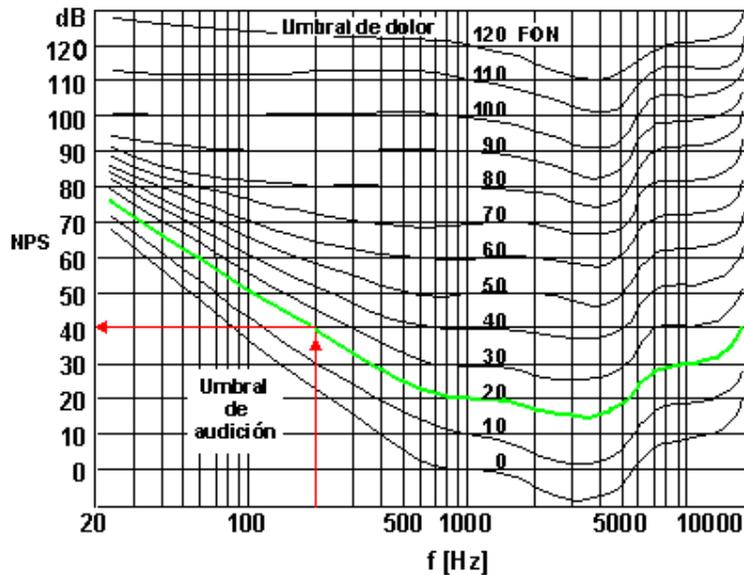


Figura 1 Curvas de Fletcher y Munson. Muestran la relación existente entre la frecuencia y la intensidad de dos sonidos para que éstos sean percibidos como igual de fuertes

Había sin embargo algunas dificultades para implementar esta red de filtrado. El más obvio era que el oído se comporta de diferente manera con respecto a la dependencia de la frecuencia para diferentes niveles físicos del sonido. Por ejemplo, a muy bajos niveles, sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles, mientras que a altos niveles, todas las frecuencias se escuchan más o menos con la misma sonoridad.

Por lo tanto, parecía razonable diseñar tres redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 dB, de 70 dB y de 100 dB, llamadas A, B y C respectivamente. La red de ponderación A (también denominada a veces red de compensación A) se aplicaría a los sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C se aplicaría a los de nivel elevado (ver figura 2). El resultado de una medición efectuada con la red de ponderación A se expresa en decibeles A, abreviados dBA o algunas veces dB(A), una medición efectuada con la red de ponderación B se expresa en decibeles B (dBB) y una medición con ponderación C se expresa en decibeles C (dBC).

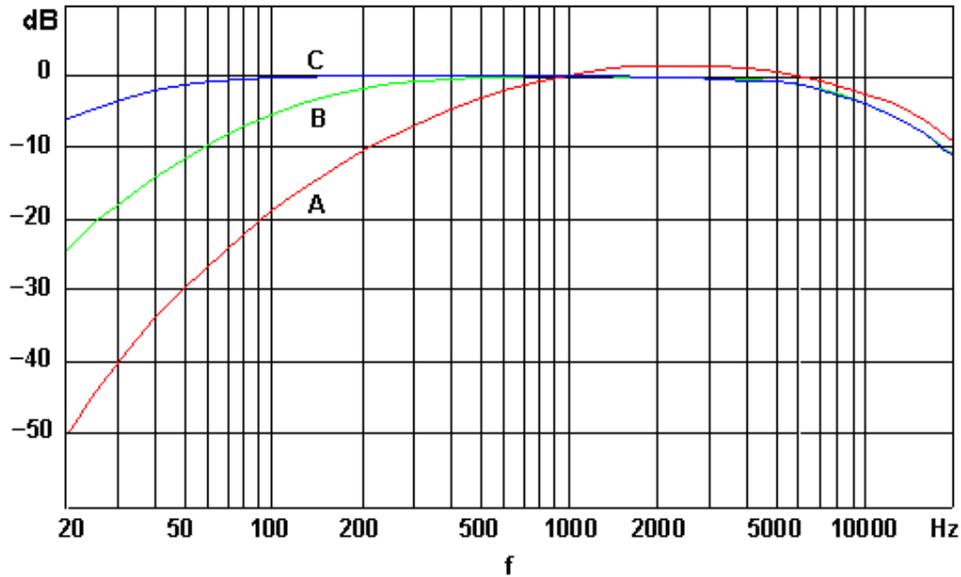


Figura 2 Curvas de ponderación A, B y C

2.1.2 Relación señal / ruido

La relación señal ruido (S/N) es la diferencia entre el nivel de la señal y el nivel de ruido. Tanto la señal (S, signal) como el ruido (N, noise) se miden en voltios. Calculando el $20\log(S/N)$ se obtiene el valor de la relación señal ruido en dB, que es la unidad más habitual de este parámetro. En el Anexo A se explica en detalle lo relativo a los dB.

Cabe distinguir en este apartado dos tipos de ruido, ambos perjudiciales para conseguir una inteligibilidad óptima. El primero es el ruido electrónico, que puede deteriorar la señal de audio y el segundo, es el ruido sonoro, que es una condición ambiental.

El ruido electrónico puede generarse en transmisión de señal debido al uso de cableado inadecuado, a largas tiradas de cable si la transmisión es analógica, a una instalación inadecuada, etc... También puede generarlo alguno de los equipos del sistema. En este caso hablamos de relación señal/ruido electrónica.

El ruido sonoro, que es el que nos incumbe desde el punto de vista acústico, es un factor ambiental. Es necesario mantener una relación señal/ruido acústica suficiente para evitar que el ruido enmascare la señal audible que contiene el mensaje.

En el contexto de este proyecto de fin de carrera, el ruido será un condicionante muy a tener en cuenta ya que por ejemplo se alcanzan elevados niveles de ruido sonoro cuando un tren realiza su entrada/salida de la estación. Por esta razón es necesario que los puntos sonoros radien un nivel de presión sonora adecuado para conseguir una ganancia acústica suficiente.

2.1.3 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (en adelante TR_{60}) es el tiempo, expresado en segundos, que ha de transcurrir para que el nivel de presión acústica disminuya en 60 dB una vez que cesa la emisión acústica producida por una fuente en funcionamiento. Este parámetro sólo tiene sentido en espacios cerrados y nos indicará lo elevada que es la reverberación de un recinto.

En la figura 3 observamos un diagrama de distribución temporal de las reflexiones, estos diagramas reciben el nombre de ecogramas. Los ecogramas sólo son válidos cuando el sonido emitido es de una duración suficientemente corta (del orden de 1ms).

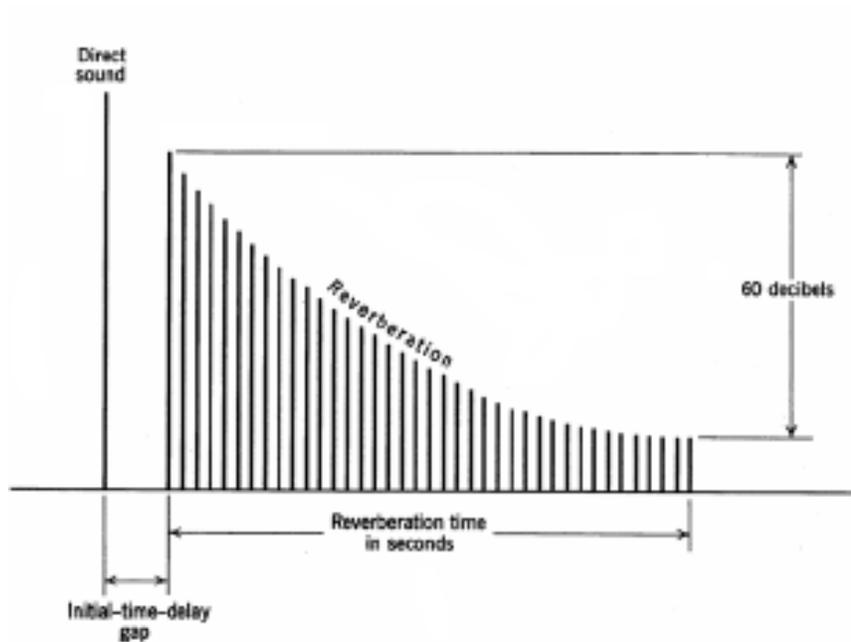


Figura 3 Diagrama que muestra la caída del sonido en los oídos de los oyentes

Pongamos un ejemplo que clarifique más este concepto: Imagínese a un violinista en el escenario en una sala de conciertos que toca una nota. La onda acústica radiada por el violín saldrá hacia todas direcciones, encontrándose en su camino con las distintas superficies de la sala (techo, paredes laterales, áreas de audiencia, balconadas si las hubiera, etc.). Un oyente como el de la figura 4 escucharía en primer lugar la onda directa (Direct Sound wave en la figura 4, seguida, después de un breve intervalo, por una sucesión de primeras reflexiones (R1, R2, R3... en la figura 4).

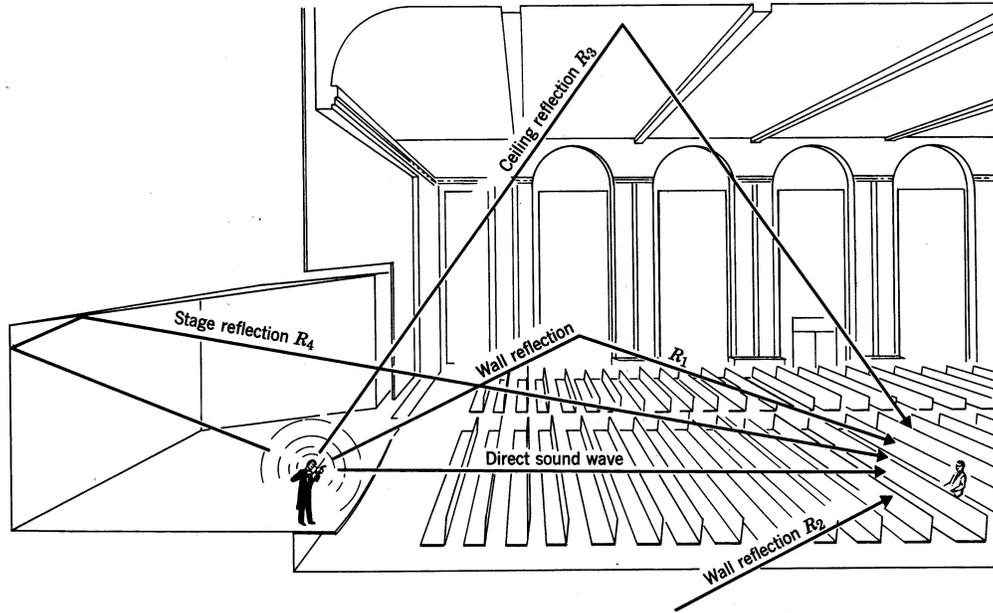


Figura 4 Trayectorias del sonido directo radiado por el violín y de las primeras reflexiones debidas a esta radiación

Esas primeras reflexiones continuarán encontrándose más superficies y surgirán más ondas reflejadas. En un segundo la simple nota del violín puede ser reflejada por las superficies unas 20 veces. Por supuesto, el sonido va atenuándose con cada reflexión y el oyente lo percibe más tenue cada vez hasta hacerlo inaudible. El tiempo en que esto ocurre es indicado por el tiempo de reverberación, de ahí la importancia de este parámetro.

Existen diferentes métodos para el cálculo del tiempo de reverberación, no es objeto de este proyecto el análisis de los mismos. Por tanto con independencia de la fórmula utilizada para el cálculo, el valor más representativo del tiempo de reverberación es el denominado RT_{mid} , que se obtiene como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 500 y 1000 Hz, $RT(500Hz)$ y $RT(1kHz)$ respectivamente.

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1kHz)}{2} (s)$$

La señal reverberante no tiene por qué ser necesariamente perjudicial, ya que puede reforzar a la señal directa, aumentando el nivel global de sonido que se percibe. Si bien hay que tener en cuenta que cuando el nivel de la señal reverberante es muy alto y sus características de esta (tiempo de reverberación, reflexiones iniciales...) no son las adecuadas, no sólo no refuerza la señal directa sino que la perjudica en términos de inteligibilidad. Este suele ser el principal problema de la mayoría de los sistemas sonoros mal diseñados en los que no se tiene un control de la relación de la señal directa con respecto a la reverberante, produciéndose efectos de enmascaramiento de la información sonora que percibe el oyente.

La reverberación existente en un recinto aumenta a medida que aumenta el volumen del recinto y disminuye si en el recinto existe absorción acústica. Por lo tanto, a efectos de reducir la reverberación, juega un papel importante el acondicionamiento acústico mediante materiales absorbentes.

2.1.4 Distancia crítica

Para definir la distancia crítica, debemos introducir antes dos conceptos: sonido directo y sonido reverberante.

2.1.4.1 Sonido directo

En una aplicación de sonorización de un recinto, un altavoz emite a un medio lo suficientemente amplio como para que se pueda considerar que la onda emitida es de tipo esférico. Este tipo de onda tiene diversas peculiaridades de entre las que nos interesa en especial la variación de los valores de presión sonora según la “Ley de Divergencia Esférica”, según la cual el nivel de presión disminuye conforme el sonido se propaga. Cuando el frente de onda es esférico, en la mayoría de los casos, el nivel de presión cae 6 dB por cada vez que se duplica la distancia. A estas se llaman pérdidas por divergencia esférica.

Teóricamente un frente de onda totalmente esférico sólo se puede conseguir si el altavoz se encuentra alejado de cualquier superficie reflectante (campo libre). Sin embargo aunque exista alguna superficie en la proximidad del altavoz, se mantiene la existencia de la ley de divergencia. Así, aunque un altavoz no se encuentre en la situación ideal de campo libre, la onda emitida cumple la ley de divergencia esférica y el frente de onda tiene la forma de un “trozo de esfera”. Esta situación se denomina campo directo. Se habla también de la onda directa o del sonido directo como aquel que proviene en línea recta desde el altavoz aunque en algún caso no cumpla al completo la ley de divergencia.

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo.

2.1.4.2 Sonido reverberante

Si el altavoz se encuentra dentro de un recinto cerrado, la existencia de múltiples reflexiones y la confinación de la propagación dentro de un local de dimensiones finitas provocara la desaparición del frente de onda esférico por el efecto de la interacción de las diversas reflexiones, provocando un campo acústico difuso, en el cual la energía acústica predominante es energía que ha rebotado o energía reverberante.

Por supuesto, en ningún caso, el nivel de presión sonora en el campo reverberante puede sobrepasar el valor del nivel de presión a la salida del altavoz. La zona donde predomina el sonido reverberante se denomina zona de campo reverberante.

Una vez definidos los conceptos de sonido directo y reverberante, podemos definir la distancia crítica como el punto del recinto en el que se cumple que el campo directo y el reverberante tienen el mismo nivel de presión sonora. Este punto de cruce se encuentra

a una cierta distancia del altavoz, que es la que marca la zona de entrada al campo reverberante, saliendo del campo directo. En la figura 5 se observa gráficamente este concepto.

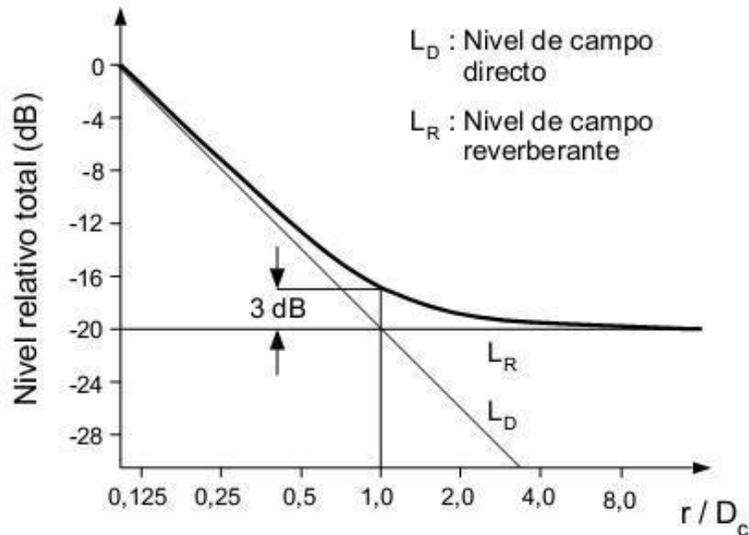


Figura 5 Evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente sonora normalizada con respecto a la distancia crítica D_c

Debe tenerse en cuenta que en la realidad, en la zona de campo directo sí existe cierta cantidad de reverberación, aunque con un nivel despreciable. Por otro lado, en la zona de campo reverberante, aunque no debería existir campo directo, pues no existe ley de divergencia ni onda esférica, sí puede reconocerse, en una primera zona, la onda que proviene directamente del altavoz.

2.1.5 Respuesta en frecuencia del altavoz

La respuesta en frecuencia del altavoz es la variación de la sensibilidad con la frecuencia, es decir, la presión sonora que entrega el altavoz para una potencia eléctrica fija y en una posición fija en función de la frecuencia. En otras palabras, es el rango de frecuencias para las que obtendremos respuesta del altavoz.

Interesa que esta respuesta sea lo más plana posible, ya que esto dará lugar a que la reproducción sonora sea más fiel a la señal original. Si la respuesta de un altavoz difiere en gran medida entre bajas y altas frecuencias, se producirá un efecto de coloreo de la señal, o aparición de componentes espectrales que no estaban presentes originalmente y eliminación de otras que sí lo estaban.

La presentación típica de la respuesta en frecuencia se muestra en la figura 6.

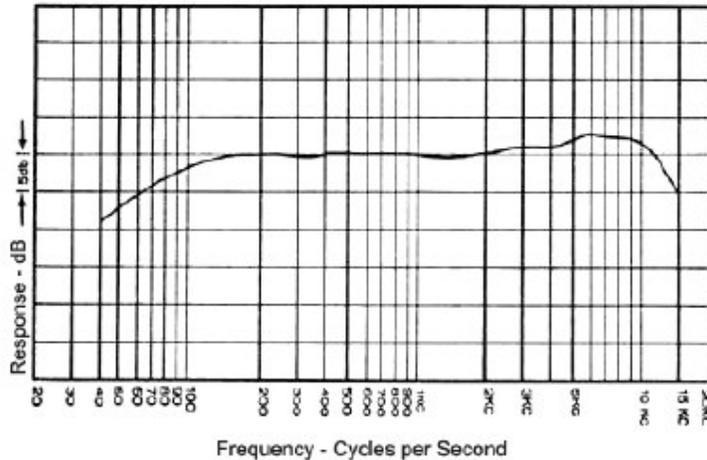


Figura 6 Respuesta en frecuencia de la señal emitida por un altavoz. Permite conocer la intensidad sonora proporcionada por el dispositivo para las frecuencias que debe reproducir

2.1.6 Saturación

La saturación de la señal de audio es un recorte de la amplitud de la señal original por exceder la amplitud de dicha señal los límites del canal de salida de alguno de los equipos que interviene en el sistema de megafonía empleado. Esta saturación se traduce en una disminución considerable de la calidad sonora y, con ello, de la inteligibilidad.

Para evitar problemas de saturación es importante adecuar los niveles de entrada y salida de la señal de audio en cada equipo de la cadena y, por supuesto, no se puede forzar a un altavoz a que radie más nivel de presión sonora del que soporta. Es importante escoger un punto sonoro que tenga una sensibilidad suficiente para poder entregar el SPL necesario que permita satisfacer los requerimientos de la sonorización.

2.2 Bases psicoacústicas

Una vez que la fuente ha emitido un sonido, éste se propaga por el espacio hasta llegar al lugar donde se encuentra el oyente.

Según los límites que existan en el espacio donde se emite el sonido, existirán distintas trayectorias posibles que recorrerá el sonido hasta llegar al oyente. Cada trayectoria supone un tiempo distinto empleado para llegar.

Así, un único sonido emitido por la fuente, puede suponer una gran cantidad de sonidos recibidos en el oído en momentos de tiempo distintos, según la disposición de las superficies del local (si existen) y según la colocación de la fuente y del oyente respecto a aquellas.

Como hemos comentado anteriormente siempre existe un sonido directo que llega desde la fuente al oyente sin reflejarse en ninguna superficie.

Dado que siempre existirá el suelo, siempre llegará, al menos, una reflexión debida a él. La existencia de otras superficies dará lugar a otras reflexiones que irán llegando en momentos distintos, desde direcciones distintas y con niveles distintos.

Es muy importante la respuesta temporal que obtengamos en el recinto a partir de la excitación provocada mediante un sistema sonoro.

2.2.1 *Periodo de integración de Haas*

El período de integración de Haas es un parámetro que indica un hecho psicoacústico muy concreto: cualquier sonido que llega al oído humano después de otro sonido, siendo el retardo entre ellos inferior a un cierto valor, no se escucha como sonido diferente sino que queda integrado junto con el anterior en una única sensación.

El oído humano es capaz de integrar las señales acústicas originadas por reflexiones de una señal directa, siempre y cuando las perciba en un intervalo de tiempo no superior a 35 ms desde la percepción de la señal principal. En estos casos, las señales reflejadas contribuyen de forma beneficiosa a la inteligibilidad, produciendo un efecto de aumento de nivel de la señal directa (el nivel la señal total percibida es la suma de los niveles de la señal directa y de las reflejadas recibidas dentro del que podemos denominar tiempo de integración del oído).

Desde que se emite la señal sonora a través de los puntos sonoros hasta que esta llega al oyente transcurre un tiempo inicial que está relacionado con el valor de la distancia del altavoz más cercano al oyente. Seguidamente, se forma lo que se llama campo sonoro temprano, debido a señales directas que llegan desde otros altavoces y a las primeras reflexiones, sobre todo en suelo y techo. El campo sonoro temprano es el responsable de la sensación de volumen y está condicionado por las dimensiones y características del recinto.

A partir de los primeros 35 ms desde la llegada del sonido directo, los ecos se vuelven más densos en el tiempo, ya que aparecen reflexiones de orden elevado procedentes de muchos altavoces. Se consideran estas reflexiones como campo sonoro difuso. La densidad de las reflexiones que le llegan al oyente en este espacio de tiempo son muy elevadas y constituyen la energía residual, que, si no es controlada, puede derivar en ecos con un nivel excesivo disminuyendo la inteligibilidad y provocando una sensación de molestia.

2.2.2 *Efecto de precedencia*

Uno de los efectos psicoacústicos importantes de la zona de primeras reflexiones es el de determinar la procedencia del sonido recibido. En principio el oído recibe reflexiones desde distintas direcciones, y el cerebro lo tiene en cuenta, pero toma una decisión al respecto de la procedencia principal del sonido. Esta decisión se toma en base al efecto de precedencia, según el cual, la procedencia del sonido queda fijada por el sonido que primero llega al oído, es decir, por el sonido que precede a los demás. A esta norma se la suele llamar también “Ley del primer frente de onda”.

Este efecto de precedencia puede ser modificado alterando el nivel de los sonidos recibidos. Si el retardo está en el margen de 5 a 35 ms y la señal que llega más tarde tiene un nivel más de 10 dB superior a la señal que llega primero, la sensación de procedencia cambia, siendo el sonido que llega más tarde el que determina el origen del sonido. Para retardos menores de 5 ms, el incremento de nivel necesario para cambiar la sensación de procedencia es menos de 10 dB. En la figura 7 se observa como varía el incremento de nivel de la fuente tardía respecto al retardo para variar la sensación de procedencia del origen del sonido.

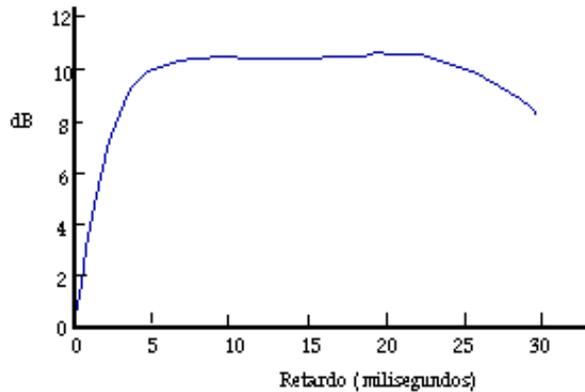


Figura 7 Incremento de nivel (en dB) de fuente tardía respecto a precedente en función del retardo (en ms)

Aplicación del efecto de precedencia

El efecto de precedencia puede utilizarse en algunos casos para controlar, según nuestras necesidades, la procedencia del sonido. Esta variación de la sensación de la procedencia del sonido se consigue utilizando retardos.

Resulta evidente que las reflexiones de un sonido emitido desde una fuente, nunca pueden tener un nivel superior al de la onda directa, por lo que la sensación de procedencia siempre corresponde con la onda precedente, que es la directa. Sin embargo, si establecemos un sistema de sonorización, en el que existen una serie de altavoces que emiten el mismo sonido, ¿cuál será el que marque el origen del sonido? En este caso el efecto de precedencia puede utilizarse para determinar la procedencia del mensaje emitido.

Vamos a ilustrar la aplicación de este efecto con un ejemplo de sonorización que se muestra en la figura 8.

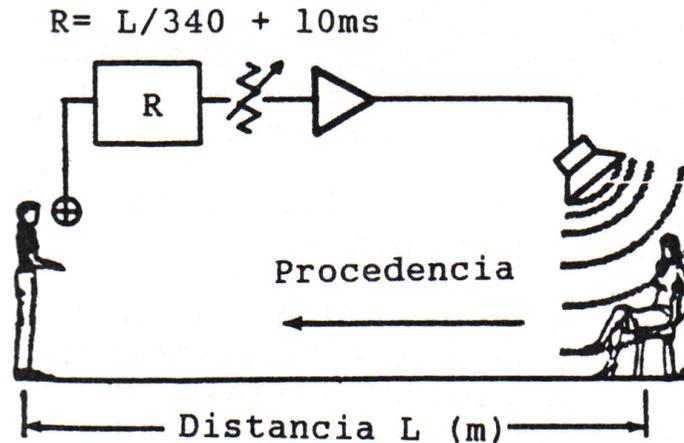


Figura 8 Ejemplo de una sonorización donde el altavoz es la fuente más cercana al oyente y queremos que la procedencia sea la de la posición del locutor

En este caso, el sonido que llega antes es el del altavoz más cercano, mientras que el sonido que viene del escenario llega más tarde. En principio, por tanto, la sensación de origen del sonido corresponde al altavoz más cercano.

Esta situación puede ser considerada como no adecuada en muchas aplicaciones, dado que quiere darse la sensación de procedencia del escenario. Para ello, la señal que llega más tarde debe ser de mayor nivel. Esto vuelve a ser imposible pues la señal del escenario tiene menos nivel de presión que la del altavoz más cercano, pues de no ser así no estaría sirviendo de nada el altavoz cercano.

La solución en estos casos es introducir un retardo electrónico en la señal que alimenta el altavoz más cercano, así, puede conseguirse que el sonido que llega antes sea el del escenario. Ahora, el sonido que llega más tarde es el del altavoz. Si además le retardamos electrónicamente otros 10 ms, se hace más tardía. La utilidad de hacerla más tardía es que puede incrementarse su nivel hasta en 10 dB respecto a la que llega del escenario, sin que se modifique la procedencia. Debe tenerse en cuenta que si el nivel del altavoz se hace superior al del escenario en más de 10 dB, la sensación de procedencia vuelve a localizarse en el altavoz.

2.2.3 *Ecos tardíos*

Cuando el retardo entre dos recepciones supera el valor de 35 ms, empieza a notarse efecto de duplicación, es decir, se percibe el mismo sonido una segunda vez, con un cierto retardo.

Si la duración del sonido fuese inferior al retardo, se percibiría una clara repetición del sonido completo (eco), sin existir solapamiento.

En la mayoría de las situaciones, el retardo es inferior a la duración del sonido y se produce un solapamiento de las dos señales que provoca una señal resultante. Dependiendo de la naturaleza del sonido (música, palabra) el efecto psicoacústico de

esa señal resultante es distinto, y el valor del retardo necesario para que exista un deterioro en la calidad de la percepción, varía.

En el caso de la palabra, que es el que nos interesa en este estudio, el efecto es el de pérdida de inteligibilidad del mensaje oral. Suele ser necesario un retardo menor para obtener eco con palabra que con música.

A pesar de todo lo indicado, en el sistema oído-cerebro el deterioro de la percepción debido a ecos no sólo depende del retardo de las señales sino también del nivel relativo entre ellas. Así puede incluso conseguirse que un retardo largo no se note si el nivel de la señal retardada es muy inferior al de la directa.

En la figura 9 aparece una curva correspondiente al criterio de Doak & Bolt^[7] al respecto del efecto de deterioro en la percepción debido a ecos, en función del retardo y del nivel de la señal retardada respecto a la directa. Al tratarse de un efecto psicoacústico, dependerá de cada persona.

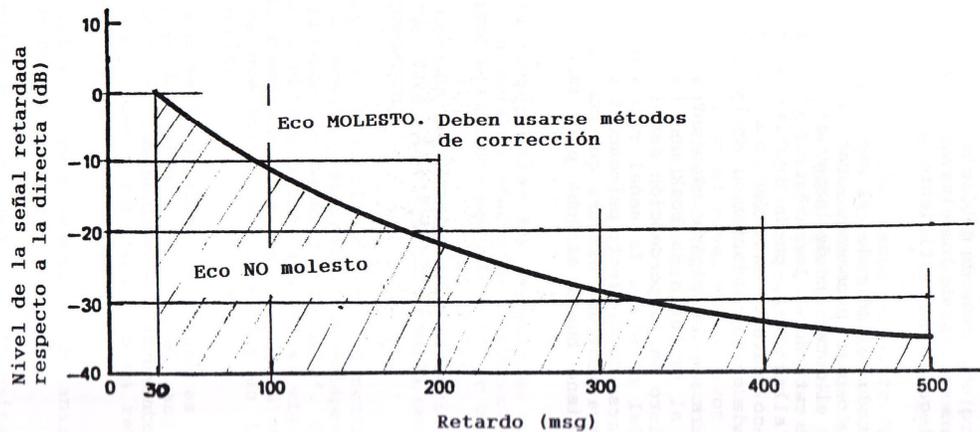


Figura 9 Criterio de Doak & Bolt para ecos. La curva mostrada asegura que con valores por debajo de ella, se obtienen ecos no molestos para más del 90% de las personas

2.3 Parámetros de evaluación

En este apartado se explicarán las soluciones técnicas para cuantificar la inteligibilidad del habla con mediciones electrónicas.

Aunque el proceso de escucha es complejo, la capacidad de oír y entender palabras de un interlocutor o sistema de sonido puede ser evaluada. En general hay dos formas de comprobar la inteligibilidad: test humano y test electrónico.

El test humano consiste en controlar ejemplos de palabras especiales emitidas a través del sistema de sonido y recoger las palabras y frases que los oyentes perciben. Se realizan estadísticas y se determina cuánto de lo que se ha dicho ha sido entendido por los oyentes. Este método no es práctico para la mayoría de aplicaciones por el tiempo que hay que emplear para obtener una muestra significativa y el precio que ello conlleva.

Los tests electrónicos ofrecen una alternativa a los tests humanos. Consisten en emitir sonido en el recinto de interés y analizar el ruido y/o reverberación introducidos en el sonido original. Los tests electrónicos pueden conseguir niveles que son muy semejantes a los conseguidos con tests humanos.

Principalmente existen tres métodos de test electrónicos para medir la inteligibilidad del habla que vamos a analizar:

- STI
- RASTI
- ALcons

Estos tres tests son los que usaremos para evaluar la calidad de las diferentes soluciones de megafonía que se verán en el proyecto. A continuación se describirán estos tests en detalle.

2.3.1 STI (*Speech Transmission Index*)

El índice STI definido por Houtgast y Steeneken^[5] permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima).

La forma de la intensidad de un sonido corresponde a una modulación de amplitud de una frecuencia portadora (la fundamental del sonido) por una señal moduladora de baja frecuencia (entre 0.5 y 16 Hz). El índice de modulación varía entre 0 y 1. En el caso de que el sonido sea voz, que es el caso que nos interesa, la señal de la palabra humana es emitida y modulada por las cuerdas vocales. Estas, en su vibración, generan distintas frecuencias que le darán el timbre a la voz, es decir, sus características particulares que la distinguirán del resto de voces. Así una voz varonil contendrá más energía en el rango de frecuencias comprendido entre 650 y 1300 Hz que una voz femenina. De igual manera una voz de mujer contiene más energía en la banda de frecuencia de octava de 2000 Hz que una masculina. Este es el motivo de que percibamos más grave la voz masculina que la femenina. Las frecuencias que contiene nuestra voz son las llamadas portadoras.

Cuando el sonido sale de las cuerdas vocales y llega a nuestra boca se produce la vocalización, o pronunciación de las sílabas que queremos emitir. Esto se consigue a base de modular la voz que sale de la garganta, con la boca, la lengua y los labios. En la vocalización se modula la señal sonora a distintas frecuencias.

El efecto de la reverberación y del ruido de fondo es el de reducir el valor del índice de modulación de la intensidad en el punto de estudio. El método STI se basa en estudiar la diferencia entre el índice de modulación originalmente emitido y el medido a la salida del sistema de sonorización.

El efecto debe estudiarse en bandas de octava, ya que el grado de modificación del índice de modulación depende de la frecuencia portadora. Para el cálculo del STI se analizan 7 bandas de octava (frecuencias de portadora), desde 125 Hz hasta 8 KHz. La tabla 1 muestra las frecuencias centrales de estas bandas.

| | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Banda de octava | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| F _m (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |

Tabla 1 Bandas de octava para el cálculo del STI

En cada una de las bandas de octava, el valor del índice de modulación se evalúa mediante el análisis de la envolvente de la intensidad. Esta envolvente tendrá frecuencias entre 0.5 y 16 Hz, y será distinta para cada banda de octava de la señal portadora que se está analizando. En la tabla 2 se muestran las 14 frecuencias de modulación consideradas son las siguientes.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|----|------|
| Nº frec. de modulación | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| F _m (Hz) | 0.63 | 0.8 | 1.0 | 1.25 | 1.6 | 2.0 | 2.5 | 3.15 | 4.0 | 5.0 | 6.3 | 8.0 | 10 | 12.5 |

Tabla 2 Frecuencias de modulación para el cálculo del STI

Se obtienen de este modo 98 valores de índice de modulación (7 frecuencias de portadora por 14 frecuencias de modulación) que por medio de promedios y ponderaciones se convertirán en un único valor.

La expresión para obtener el valor STI es:

$$STI = \alpha_1 \cdot MTI_1 - \beta_1 \cdot \sqrt{(MTI_1 \cdot MTI_2)} + \alpha_2 \cdot MTI_2 - \beta_2 \cdot \sqrt{(MTI_2 \cdot MTI_3)} + \dots + \alpha_7 \cdot MTI_7$$

donde:

- β_k – factor de corrección de redundancia,
- α_k – factor de ponderación de banda de octava,
- MTI_k - *Modulation Transfer Index* que viene dado por la siguiente expresión:

$$MTI_k = \frac{1}{14} \sum_{f=1}^{14} TI_{k,f}$$

donde:

$TI_{k,f}$ – Índice de transmisión para la banda de octava k y la frecuencia de modulación f . (El cálculo de este índice de transmisión no es del alcance de este proyecto, puede ser consultado en la referencia [5])

2.3.2 RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*)

El RASTI es una versión simplificada del STI. La simplificación consiste en reducir el número de frecuencias de modulación, así como las bandas de octava a tener en cuenta.

En concreto, la medida se realiza sólo en dos bandas de octava de la señal portadora, concretamente 2 KHz y 500 Hz. En la banda de 500 Hz se analizan sólo 4 frecuencias moduladoras (1, 2, 4 y 8 Hz). En la banda de 2 KHz se utilizan 5 frecuencias

moduladoras que no coinciden con las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava usadas para el análisis. Concretamente 0.7, 1.4 2.8, 6 y 11.2 Hz.

Por lo tanto, con el método RASTI de los 98 valores de MTF que se utilizan en la evaluación del STI se utilizan 9.

Este método, aunque hace uso de menos datos, permite evaluar el valor del STI con suficiente precisión en la mayoría de las situaciones que se encuentran en los auditorios.

En la figura 10 vemos de manera gráfica las bandas de octava y las frecuencias de señal portadora analizadas para el método RASTI.

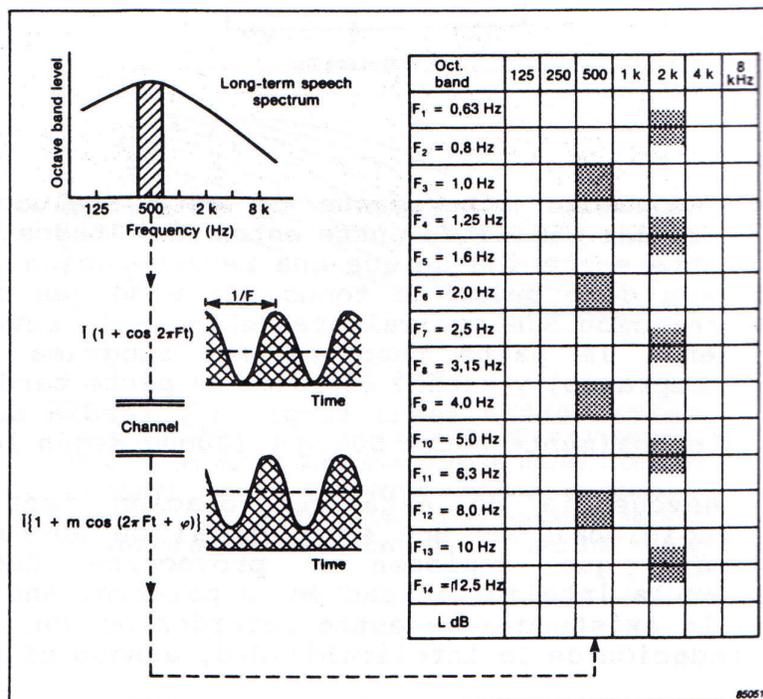


Figura 10 Resumen de frecuencias de modulación y bandas de octava en método RASTI

El método RASTI ha sido tomado como un estándar del IEC (*International Electrotechnical Commission*) para mediciones de inteligibilidad. Existen equipos de medida que generan la señal de prueba y analizan la señal recogida por un micrófono de medida en la posición del oyente.

Un detalle interesante es que la señal de prueba es una única que contiene las 9 modulaciones de las dos bandas portadoras. Esta es una gran diferencia respecto a la medida del STI en la que cada modulación se mide por separado.

Otra variación respecto al STI es el hecho de que la evaluación de la coincidencia del nivel en cada banda entre la señal de prueba y la voz se realiza mediante el nivel de presión ponderado A.

Los valores de STI / RaSTI obtenidos tienen la siguiente interpretación:

| STI (o RaSTI) | Calidad subjetiva de inteligibilidad |
|------------------|--------------------------------------|
| 0 < STI < 0.3 | mala, cuestionable |
| 0.3 < STI < 0.45 | pobre, regular |
| 0.45 < STI < 0.6 | aceptable |
| 0.6 < STI < 0.75 | buena, muy buena |
| 0.75 < STI < 1 | excelente |

Tabla 3 Interpretación de valores STI / RASTI

2.3.3 %ALcons (*Pérdidas de articulación de la palabra*)

El término ALcons hace referencia a la pérdida de articulación de las consonantes, fuertemente relacionada con la pérdida de inteligibilidad. La pérdida de inteligibilidad de consonantes decrece a medida que aumenta la distancia hasta un valor determinado (denominada distancia límite D_L) más allá del cual la inteligibilidad se mantiene constante, dependiendo únicamente de la reverberación de la sala.

Antes hemos comentado como la inteligibilidad depende de la reverberación y la distancia. Además existe una dependencia con el nivel de ruido de fondo, más concretamente con la relación S/N. Por ello, la metodología a seguir para la evaluación de ALcons es la siguiente:

- **Evaluación de la S/N:** La evaluación de la S/N se realiza mediante mediciones o valoraciones de nivel en banda ancha y con ponderación A, tanto para la señal de voz como para el ruido de fondo.
- **Evaluación de TR_{60} :** La evaluación de TR_{60} que se usa en los cálculos, es el correspondiente a la banda de 2 KHz, que es la más influyente en la inteligibilidad de la palabra.
- **Cálculo de distancia límite:** El valor de la distancia límite es de 3.16 veces la distancia crítica, el cálculo se realiza para 2 KHz y en el eje de la fuente.
- **Aplicación de la fórmula:** Para obtener el valor de %ALcons utilizamos la siguiente expresión:

$$\%ALcons = \begin{cases} \frac{200 \cdot D_2^2 \cdot TR_{60}}{V}, D_2 < D_L = 3.16 \cdot D_C \\ 9 \cdot TR_{60}, D_2 > D_L \end{cases}$$

donde:

- D_2 – distancia del altavoz al oyente más lejano en metros,
- D_L – distancia límite,
- TR_{60} – es el tiempo de reverberación en segundos,
- V – el volumen de la sala en metros cúbicos.

➤ **Conclusión:** La tabla 4 muestra los valores de ALcons. Como criterio de diseño se toma siempre $ALcons < 15\%$ aunque debe recordarse que estos datos son estadísticos y por tanto pueden existir personas que con $ALcons = 15\%$ no entiendan bien la palabra. Si existe una $S/N > 25$ dB, basta que TR_{60} sea menor de 1.5 segundos para que exista un valor de ALcons inferior al 15% en todo el recinto. Así un recinto con un TR_{60} menos de 1.5 segundos no debería tener más problema con la inteligibilidad que el de tener un nivel suficientemente alto respecto al ruido.

Su desarrollo se debe a Peutz y a Klein de la Universidad de Nijmegen (Holanda) [8] y [9]. Los valores de ALcons obtenidos tienen la siguiente interpretación:

| Alcons | Inteligibilidad |
|------------|-----------------|
| 0% - 5% | Muy buena |
| 5% - 10% | Buena |
| 10% - 15% | Aceptable |
| 15% - 20% | Pobre |
| 20% - 100% | Insuficiente |

Tabla 4 Interpretación de valores de %ALcons

3 Diseño y desarrollo

En este apartado se describen las características acústicas y arquitectónicas de la estación objeto del proyecto. También se presenta y describe el software utilizado para realizar las diferentes simulaciones y modelado de la estación.

3.1 Descripción del recinto

Las estación objeto de este proyecto es de reciente construcción (construida en los últimos 5 años). Los rasgos arquitectónicos que diferencian a esta estación de estaciones de construcción anterior podríamos resumirlos según las siguientes características arquitectónicas:

- Techos de mayor altura que estaciones antiguas. Los vestíbulos son mucho más amplios, con techos a alturas nunca inferiores a seis metros.
- Andenes más anchos. En estaciones antiguas nos encontramos andenes de hasta tres metros y medio de anchura. En las estaciones nuevas nunca tienen menos de seis metros de ancho.
- Existencia mínima de recovecos. La estación es de sección rectangular. Los techos en bóveda se han eliminado y ahora son planos. Los únicos recovecos que aparecen a lo largo de los andenes son los accesos al público, que se encuentran sonorizados por los puntos sonoros que cubren las escaleras.

Las características acústicas del recinto son las siguientes:

- Existen paneles de vítrex en las paredes de la estación, que cubren una altura de dos metros de la superficie desde el suelo.
- Los andenes son de terrazo.
- Los techos son de hormigón.
- En el resto de la pared (desde el final del panel de vítrex hasta el techo) se usa una rejilla metálica con perforaciones amplias.
- El tiempo de reverberación es elevado. Los materiales siguen siendo reflectantes (como en las estaciones antiguas) y las dimensiones del recinto mayores, por lo que los tiempos de reverberación también aumentarán.

La figura 11 muestra fotografías tomadas de los andenes de la estación a sonorizar.



Figura 11 Fotografías de los andenes a sonorizar

Basándonos en las características que acabamos de enunciar, se ha desarrollado un modelado en EASE 4.1 que se comenta en detalle en el siguiente punto.

3.2 Software de análisis EASE

Para analizar las soluciones de megafonía en el área a sonorizar nos basaremos en el software EASE 4.1 de Renkus-Heinz Inc. a partir del modelado realizado de la estación.

EASE es reconocido en todo el mundo como el estándar en modelizado y simulación acústico. Cuenta con una base de datos en la que están incluidos altavoces de más de 70 fabricantes de reconocido prestigio internacional. Para ello cuenta con una librería llamada GLL (Generic Loudspeaker Library), un formato de datos orientado a objetos complejo y descriptivo diseñado para almacenar e intercambiar datos sobre sistemas de altavoces y fuentes acústicas de cualquier tipo.

EASE proporciona una serie de herramientas para realizar un modelado detallado y una simulación precisa del recinto a sonorizar, dando información acerca del comportamiento del sistema analizando distintos parámetros, en este proyecto nos basaremos en los índices RaSTI, %ALcons y en el nivel SPL. EASE proporciona una herramienta de modelado 3D para poder modelar el mapa del recinto que queremos analizar. Para realizar el modelado de este proyecto se tomaron medidas del recinto “in situ” con un medidor láser.

En el contexto de este Proyecto de Fin de Carrera las dimensiones del modelado se han introducido basándonos en los planos facilitados por la propiedad en formato digital (Archivos de Autocad) y en medidas realizadas en la propia estación con los replanteos necesarios.

Las figuras 12 y 13 muestran vistas del modelado realizado en EASE 4.1 para la estación objetivo.

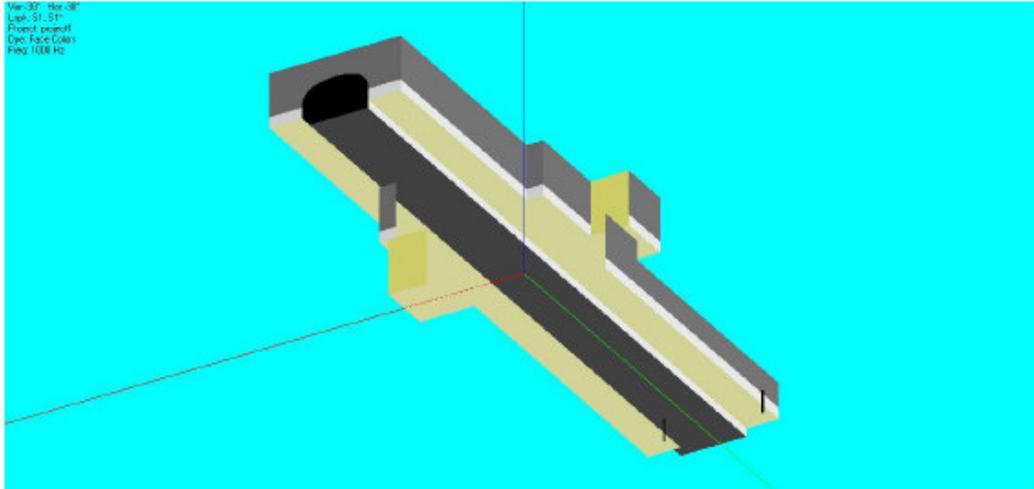


Figura 12 Vista general del modelado para la estación

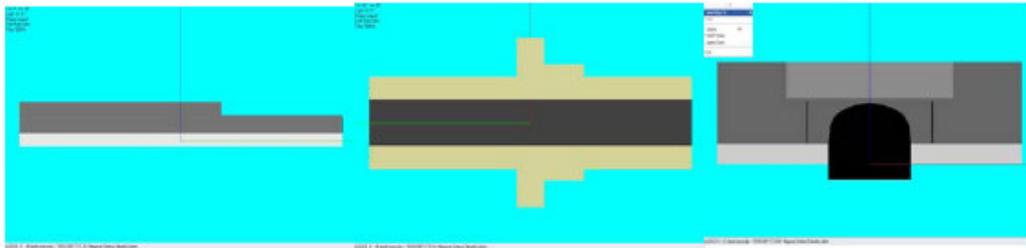


Figura 13 Vista de perfil (izquierda), planta (centro), frontal (derecha)

La figura 14 muestra una vista que ha sido generada con el módulo de renderización de EASE 4.1, y se corresponde con la vista general de los dos andenes.

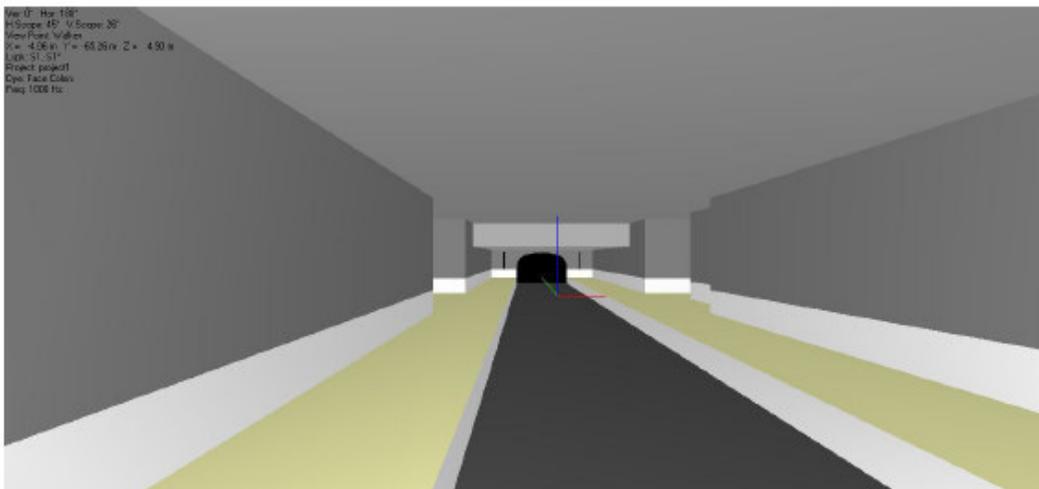


Figura 14 Vista general de los dos andenes

Una vez realizado el modelado del recinto, EASE permite realizar muchos tipos de simulaciones distintas, en este proyecto nos centraremos en las que más nos interesan que son: SPL directo, ALcons y RaSTI.

En primer lugar, se define un área de audiencia que será donde el programa realice los cálculos. Dichas áreas coinciden con la superficie de los andenes y se sitúan a una altura de 1,5 metros desde el suelo (altura media del oído humano). Estas áreas de audiencia son divididas en una malla de una gran cantidad de puntos (16150 puntos) en cada uno de los cuales se calculará el valor de los parámetros acústicos en cuestión.

Los resultados que se presentan son: valores de RaSTI, ALcons y niveles de presión sonora (SPL).

Dichos valores se presentan de dos maneras: en forma de mapas gráficos y en forma numérica. Los mapas muestran los valores de los parámetros acústicos obtenidos en las áreas de audiencia. Los valores numéricos se presentan como distribución porcentual de los mismos en el andén, es decir, se presentan los valores repartidos en franjas y se muestra el tanto por ciento dentro del total de puntos con el que aparecen dichos valores.

En las secciones posteriores se presentarán valores para dos situaciones en cuanto el ruido de fondo:

- 1) Sin tren en la estación, con el ruido generado por los viajeros y sus conversaciones.
- 2) Con tren en estación. Esta será la situación más crítica a la hora de realizar la sonorización.

Ambos ruidos fueron medidos con un sonómetro en la propia estación.

3.3 Caracterización del recinto

En este apartado se realiza una caracterización del recinto mediante:

- Tiempo reverberación: Para medir el tiempo de reverberación optamos por una aproximación a partir de la fórmula que asocia el valor de este al volumen del recinto, y de los coeficientes de absorción de los materiales conocidos. Realizamos esta aproximación por no poder realizar las medidas “in situ” y por considerar la aproximación con la fórmula suficientemente válida. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$T = \frac{0.161V}{S\bar{\alpha}}$$

donde:

- V es el volumen del recinto en m³,
- S es el área en m², y

- $\bar{\alpha} = \frac{A}{S}$, que es el coeficiente de absorción de Sabine siendo A la absorción total en m².

En la figura 15 podemos ver el resultado de esta aproximación.



Figura 15 Tiempo de reverberación

Observamos valores muy elevados, ya que en valor del tiempo de reverberación influye tanto el volumen del recinto como los coeficientes de absorción de sus superficies:

- ♦ Ruido de fondo: El ruido de fondo fue medido mediante un sonómetro en régimen de funcionamiento normal de la estación. En la figura 16 presentamos a los valores medidos cuando el tren no está en la estación ni próximo a ella (aunque con presencia de personas en la misma) y en la figura 17 el ruido de fondo con el tren en la estación.

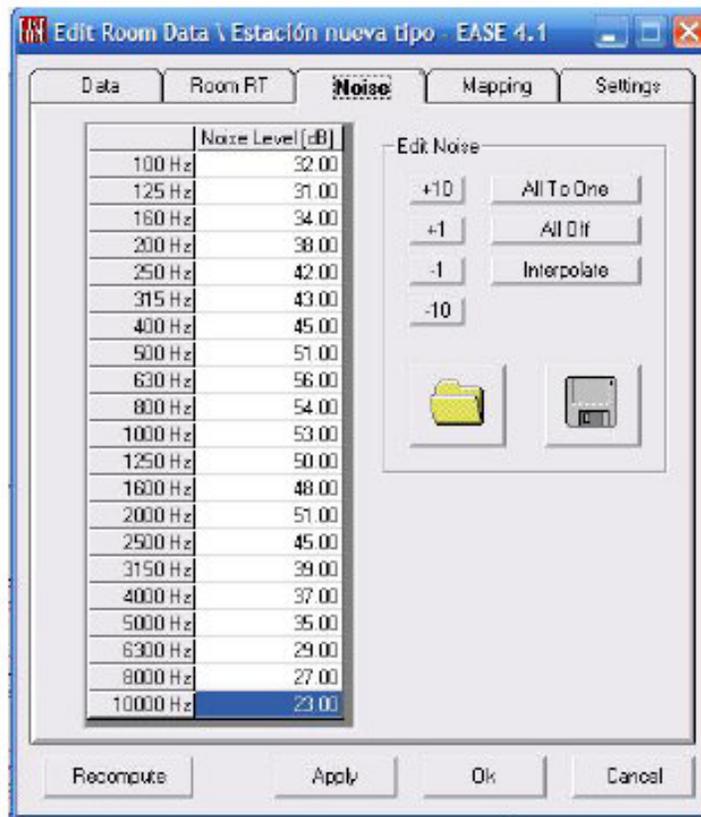


Figura 16 Ruido sin tren en la estación

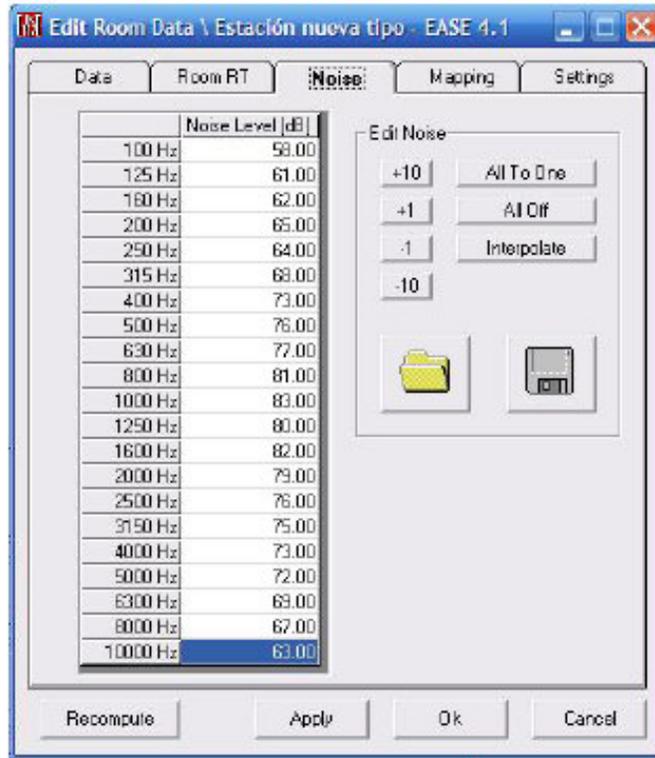


Figura 17 Ruido con tren en la estación

- ♦ **Coefficientes de absorción:** Para cualquier diseño acústico es necesario tener los coeficientes de absorción de los materiales obtenidos mediante ensayos en laboratorio, en este caso se han tomado los valores de catálogos con información sobre los coeficientes de absorción de los materiales presentes en la estación. En un recinto, la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, cuando inciden sobre sus superficies es determinante en la calidad acústica del mismo. Por lo tanto, algunos de los materiales de construcción (paneles vítrex, terrazo, hormigón...) se han caracterizado conforme a sus coeficientes de absorción. En las figuras 18, 19 y 20 se muestran los coeficientes de absorción de los diferentes materiales presentes en la estación.

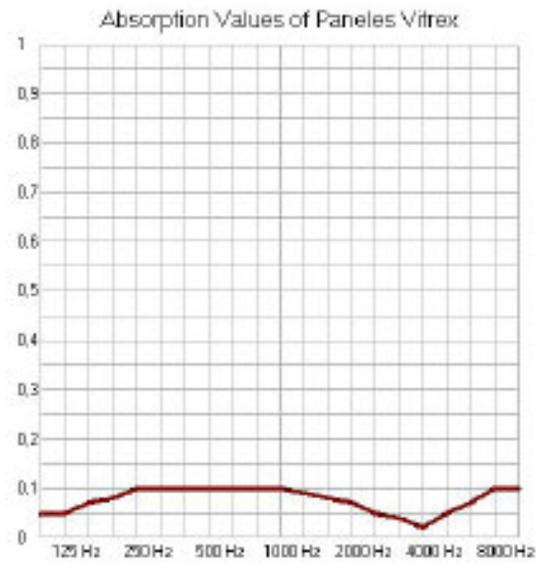


Figura 18 Coeficiente de absorción de los paneles de Vitrex

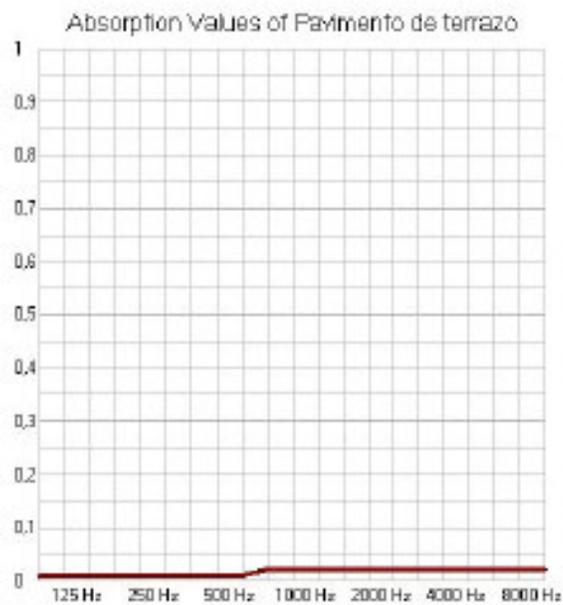


Figura 19 Coeficiente de absorción del terrazo

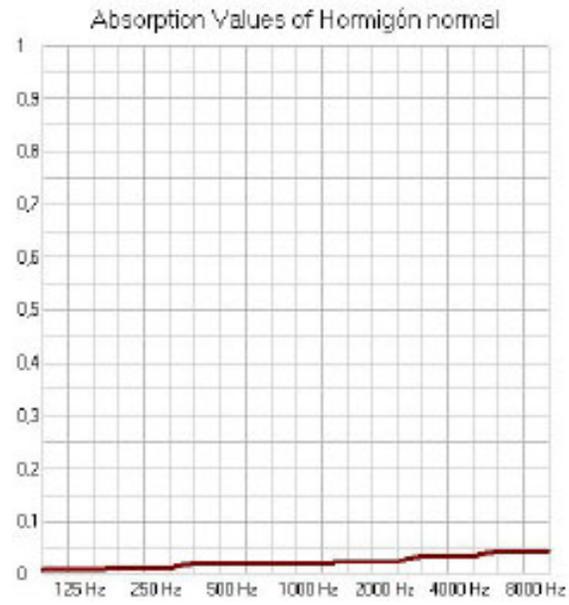


Figura 20 Coeficiente de absorción del hormigón

4 Pruebas y resultados: megafonía clásica

Las estaciones subterráneas han optado desde hace años por soluciones de megafonía clásica tipo distribuida, ya que contando con los recursos que el mercado ofrecía (a unos costes que no fuesen demasiado elevados) era la solución que mejor se adecuaba a sus exigencias.

Los sistemas distribuidos sonorizan el área de audiencia utilizando múltiples altavoz repartidos por la zona que se quiere sonorizar. Sin embargo, no necesariamente un mayor número de puntos sonoros se traduce en mayor inteligibilidad del mensaje reproducido como veremos más adelante.

4.1 Características sistema distribuido

En los sistemas distribuidos los altavoces se sitúan en puntos diferentes intentando cubrir una zona de audiencia lo más amplia posible. Existen dos tipos de sonorización distribuida: la que emplea altavoces de pared y la que emplea altavoces de techo.

Los altavoces de pared se colocan de tal manera que coincidan sus ángulos de recubrimiento en la zona de audiencia, como muestra la figura 21.

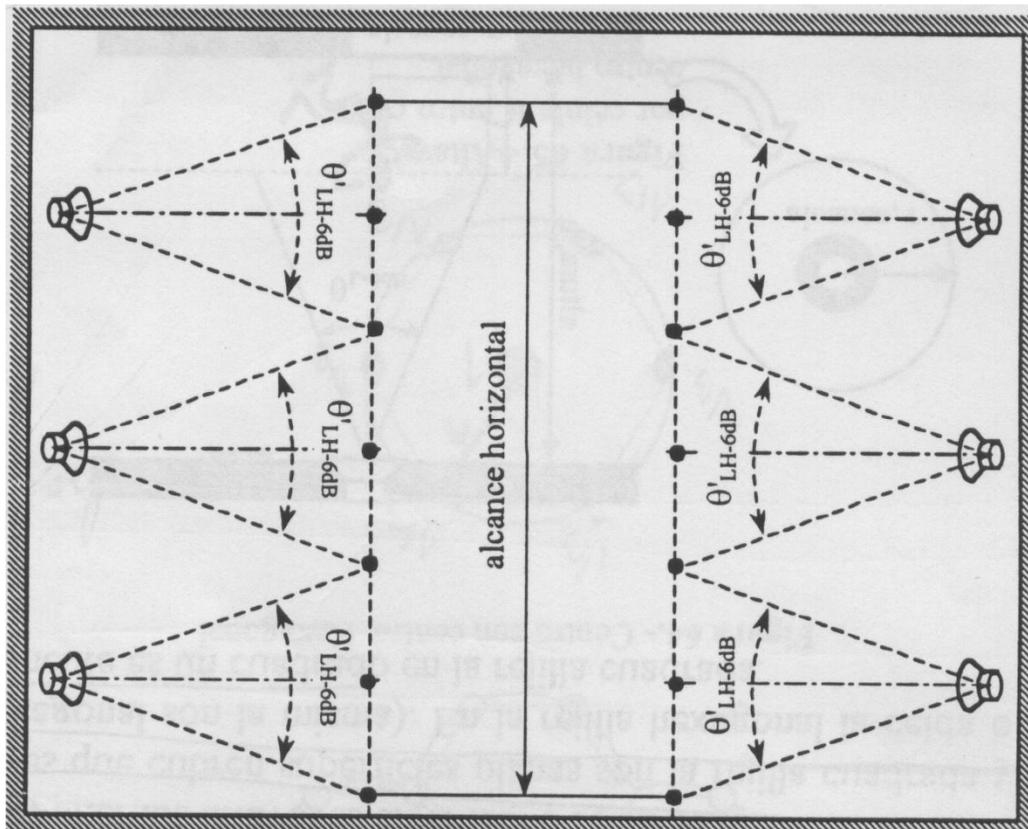


Figura 21 Colocación de altavoces de pared en un sistema distribuido

Si queremos preservar el efecto precedencia (descrito en la sección 2.2.2) debemos de orientar los altavoces ligeramente hacia atrás y aplicarles el retardo adecuado.

Para altavoces de techo también se sigue el criterio del ángulo de cobertura, pero en este caso la geometría es diferente. En la figura 22 se muestra tal geometría. Se supone que los altavoces son circulares y tienen simetría de revolución. Por tanto el área cubierta por el alcance, en planta (si el suelo es horizontal) es un círculo de radio r .

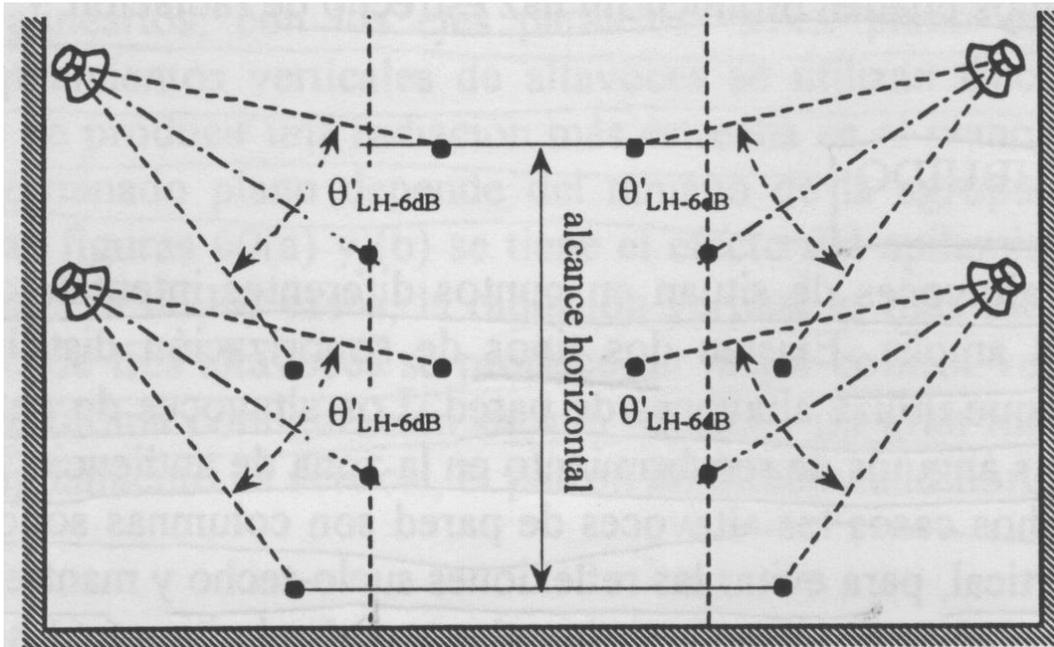


Figura 22 Colocación de altavoces de techo en un sistema distribuido

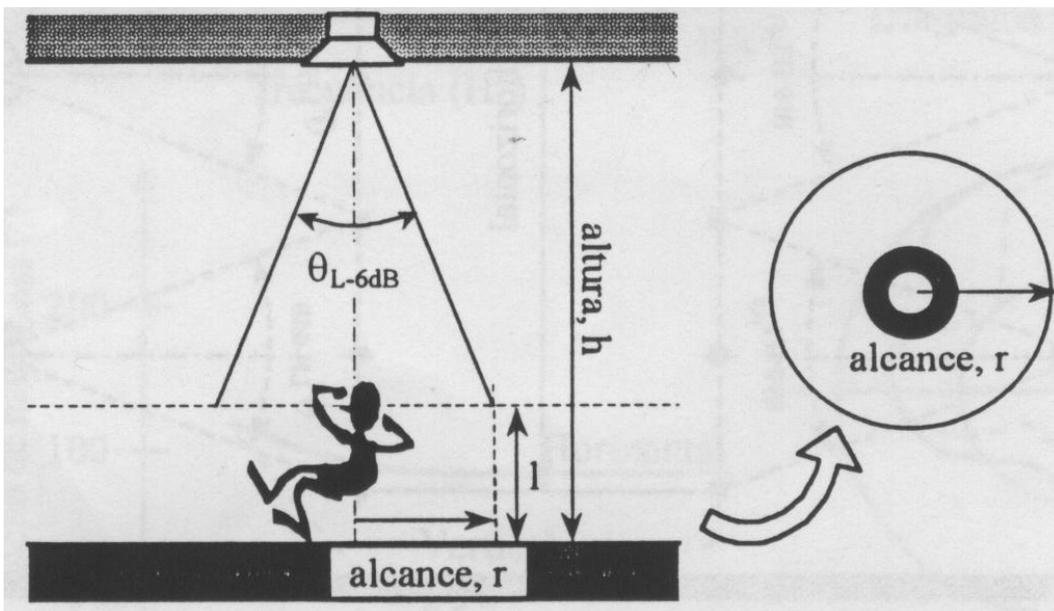


Figura 23 Vista gráfica de los parámetros altura del techo (h), alcance horizontal (r) y altura de la audiencia (l)

A la hora de disponer los altavoces en el techo se seguirá un patrón consistente en una rejilla regular (puede ser cuadrada o hexagonal). El número de altavoces necesario para sonorizar un área de audiencia con superficie A se calcula mediante la expresión:

$$N = (\text{Altavoces por célula} / \text{Área de la célula}) * A$$

La rejilla empleada en este caso es de tipo cuadrada borde con borde como la de la figura 24. En este caso las áreas circulares del alcance están en contacto. Los altavoces más próximos separados por dos veces el alcance r .

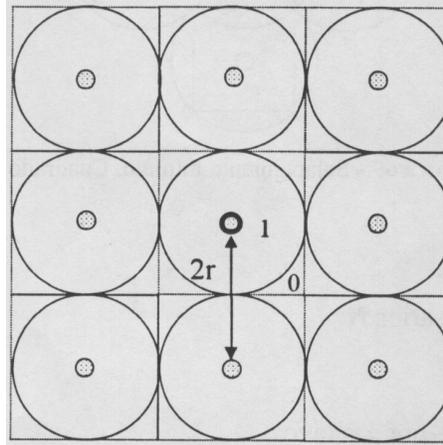


Figura 24 Rejilla tipo cuadrada borde con borde para conseguir sonorizaciones distribuidas con una cobertura sonora homogénea.

4.2 Análisis del punto sonoro

El punto sonoro empleado en las sonorizaciones basadas en megafonía tradicional es un proyector sonoro bidireccional convencional. La característica que distingue a este tipo de proyectores es que su radiación es bidireccional, es decir, que radia por sus dos extremos. En la figura 25 se presenta una imagen de un proyector bidireccional tipo.



Figura 25 Proyector bidireccional usado en megafonía tradicional. El lado oculto del proyector es idéntico al que se observa en la fotografía.

Este tipo de punto sonoro es de sonido industrial. Suelen ser puntos económicos en los que la calidad de reproducción no está cuidada. A continuación se exponen una serie de limitaciones asociadas al uso de este tipo de puntos sonoros así como de su distribución en la estación.

- ♦ **Respuesta en frecuencia deficiente:** En la figura 26 presentamos una respuesta en frecuencia tipo de esta clase de proyectores.

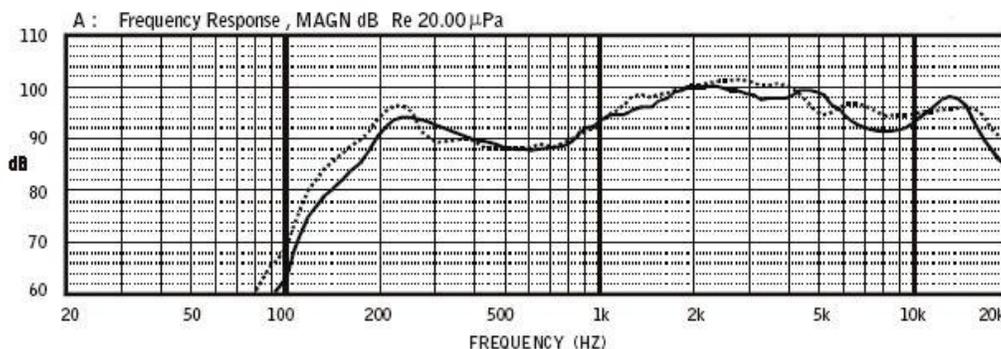


Figura 26 Respuesta en frecuencia de proyector bidireccional

Se observan grandes fluctuaciones en medias frecuencias, con diferencias de hasta 12 dB. La señal, por tanto, presentará coloración, es decir, que los puntos sonoros no reproducen la señal tal cual se la entrega la fuente si no que introduce variaciones en su espectro. Como consecuencia de esto el sistema tiene baja fidelidad entre lo que emite la fuente y lo que reproducen los puntos sonoros.

- ♦ **Situación de los puntos sonoros en el andén:** La solución inicial de megafonía de la estación, basada en megafonía tradicional, opta por la situación de los puntos sonoros en el andén de la estación en las luminarias, separados 6,5 metros aproximadamente entre sí, con el eje de radiación paralelo a la superficie del andén.

El uso de estos puntos sonoros presenta una clara limitación. Lo ideal es poder orientar el haz sonoro hacia el área de audiencia a fin de maximizar el campo directo y minimizar el campo reverberante, ya que la energía sonora se enfoca directamente hacia el oyente.

El haz de una de las superficies radiantes se enfoca hacia el andén tal y como hemos descrito antes, pero el haz radiado por el transductor de la superficie opuesta radia hacia el techo, con lo que se excita el campo reverberante y se descontrola la energía radiada, con la posible aparición de ecos molestos para oyentes que se encuentren en otras zonas del andén. En la figura 27 presentamos un esquema explicativo de estos hechos.

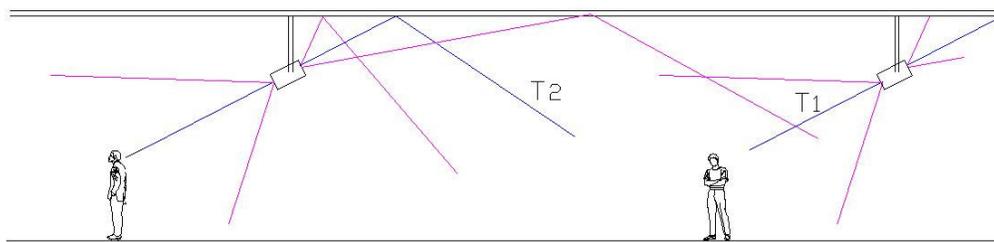


Figura 27 Esquema de solución con proyectores bidireccionales

Como consecuencia de esta distribución de los puntos sonoros aparecen una serie de efectos indeseados que comentamos a continuación:

- **Energía residual elevada:** En la figura 27, las líneas de color azul representan la radiación axial del altavoz, es decir, la dirección de mayor energía de radiación que coincide con la perpendicular al plano de la superficie radiante. Las líneas de color magenta representan las líneas de directividad de -6 dB, es decir, dentro de la superficie que delimitan las pérdidas de SPL radiado debidas a la directividad, serán menores a 6 dB con respecto a SPL radiado en el eje (SPL máximo). Fuera de estas líneas las pérdidas de SPL radiado debidas a la directividad del altavoz serán mayores a 6dB.

Como se observa, las líneas magenta forman entre si un ángulo de aproximadamente 100° (como dijimos antes, es la dispersión que suelen presentar los proyectores bidireccionales convencionales, entre 90° y 110°). Esto provoca que la energía residual (energía que es radiada a zonas donde no se encuentran viajeros y por tanto no nos interesa cubrir) sea elevada.

La energía sonora radiada por el altavoz no es dirigida hacia el oyente, con lo que gran parte de la energía radiada es residual (la que no se dirige hacia los oyentes, que es el lugar a sonorizar) y se excita el campo reverberante. En cuanto a este punto, lo ideal es tener una fuente muy directiva apuntada hacia los viajeros. Esto implica que prácticamente toda la energía radiada será energía útil (energía dirigida hacia los viajeros) y se minimiza el campo reverberante.

- Cancelaciones de fase de la señal: La dispersión de este tipo de proyectores suele ser cercana a los 100° H x 100° V (entre 90° y 110°) para cada transductor que radia (uno por cara). Al estar insertados en el mismo chasis ambos transductores, cada uno radiando en un sentido dentro de la misma dirección, las vibraciones de uno afectarán al otro y viceversa. Esto se traduce en diferencias de fase entre ambas radiaciones que provocarán un peor rendimiento del punto sonoro en su conjunto.

El tener altavoces con sus sentidos de radiación enfrentados provoca efectos negativos en la escucha. Dependiendo de la distancia a la que el viajero se coloque en un punto del andén entre dos altavoces contiguos, se producirán cancelaciones de señal a determinadas frecuencias. Esto es debido al siguiente efecto:

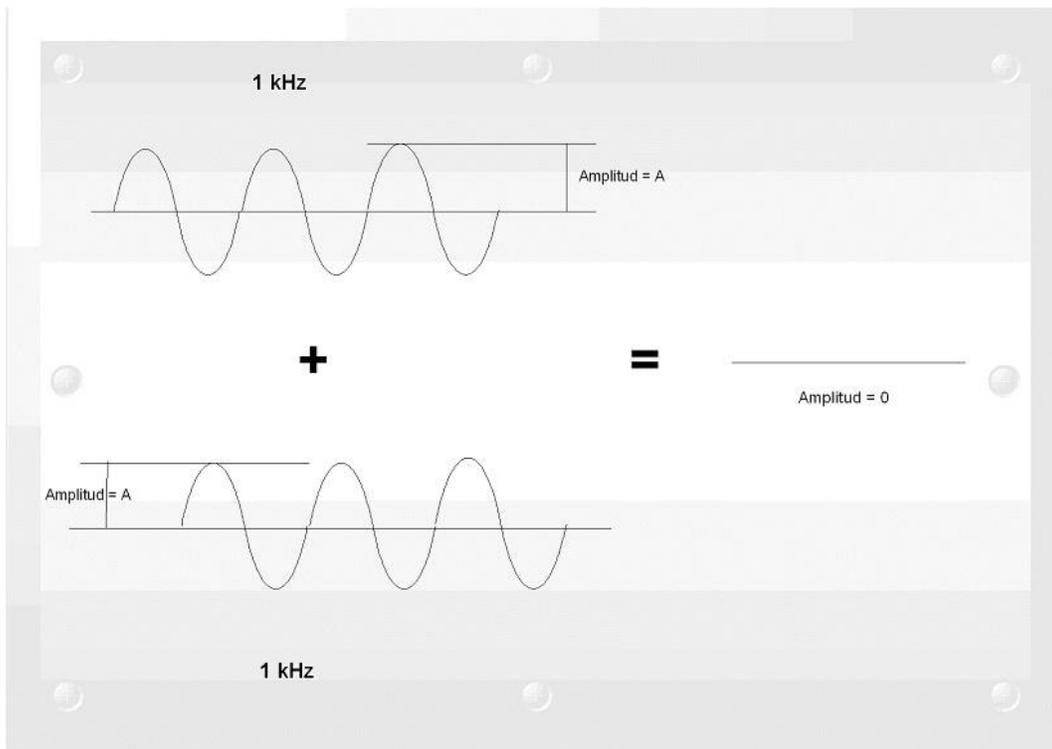


Figura 28 Cancelación de señal

Las diferencias de fase en la radiación de los altavoces enfrentados provoca que, según en que posición y a que frecuencias se este radiando, haya cancelaciones de la señal emitida. Pero no sólo eso, habrá puntos y para determinadas frecuencias donde la interferencia será constructiva y producirá aumento de nivel no deseado. Este efecto se denomina filtro peine, y ocurre cuando sumamos a una señal la misma señal retardada K segundos y atenuada α dB.

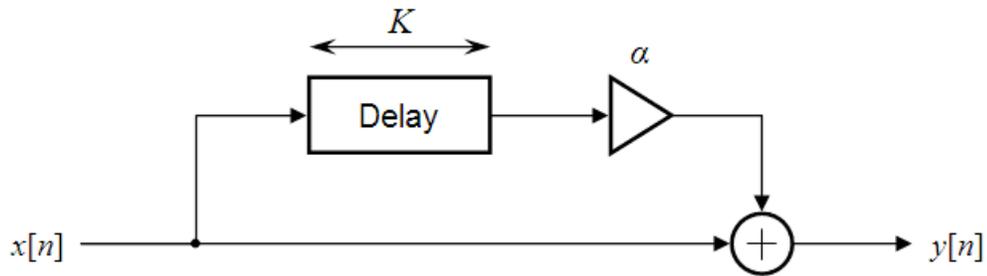


Figura 29 Estructura general de un filtro peine

La señal original será la que le llega al oyente desde el altavoz más cercano y la señal retardada es la que le llega desde el segundo altavoz más cercano. El retardo será la diferencia de camino recorrido por el sonido desde un altavoz al oyente y desde el otro altavoz al oyente. La atenuación α será de pocos dB a que las superficies de la estación son muy reflectantes (esto implica poca absorción).

Esto provoca que el oyente perciba el sonido difuso y con alteraciones de nivel, que dependerán de la posición del viajero en el andén y de las frecuencias emitidas.

Así, el SPL de la señal percibida por el oyente variará en función de la frecuencia como se indica en la siguiente figura:

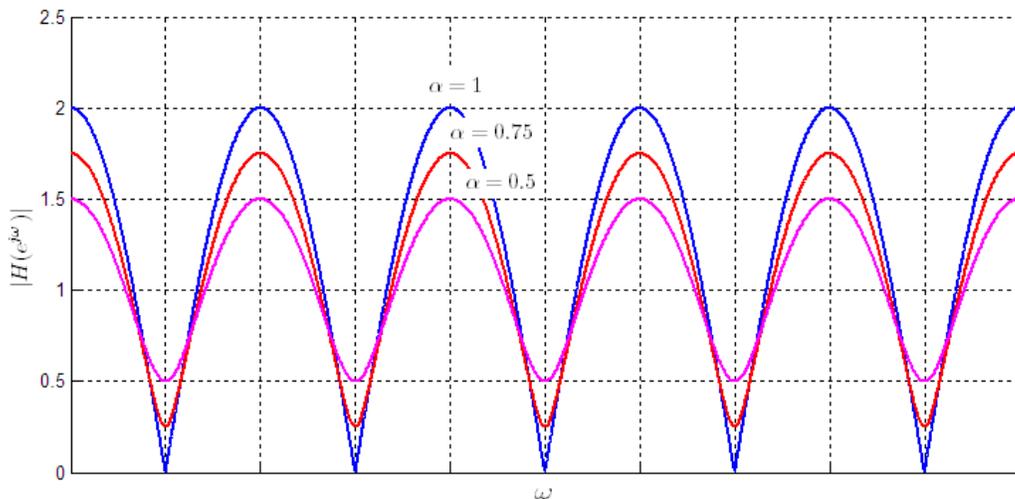


Figura 30 Magnitud de la respuesta en frecuencia para distintos valores de α

- Ecos molestos: Por otra parte, vemos como la energía radiada por la superficie del proyector más lejana al viajero se dirige directamente hacia el techo al ser puntos sonoros bidireccionales.

Después del rebote, la dispersión del sonido será muy grande, incrementando el campo reverberante sin aportar energía al campo directo. Además, esta energía radiada hacia el techo puede ser molesta en otras zonas del andén. Así, según la

figura de arriba, el señor de la izquierda recibirá un mensaje procedente del altavoz de su derecha con un retardo T_1 desde que el altavoz lo radia hasta que llega a sus oídos. Más tarde, recibirá el mensaje procedente de la energía radiada hacia el techo por el altavoz de la izquierda, que llegará con un retardo T_2 .

Si la diferencia de retardo ($T_1 - T_2$) es mayor a 35 ms, este señor percibirá la segunda señal en llegar a sus oídos como un eco de la primera. Si este eco tiene SPL suficiente (al ser las superficies reflectante, en el rebote con el techo no se atenuará apenas la energía sonora de la onda, de forma que es muy probable que alcance al viajero de la derecha con un SPL elevado) será molesto para el viajero y disminuirá la inteligibilidad del mensaje.

4.3 *Análisis mediante software EASE de megafonía distribuida*

A continuación presentamos los resultados obtenidos en la simulación realizada en EASE 4.1. Para la simulación se emplearon puntos sonoros de aluminio separados 6 metros entre sí y apuntados hacia el centro del andén.

La altura a la que están colocados es la de la luminaria, que no se ha modelado ya que bajo el punto de vista acústico su efecto es despreciable.

El análisis se realizará en ausencia de tren y con tren en la estación para así tener el análisis de todos los casos en los que puede encontrarse la estación.

Analizaremos los siguientes parámetros:

- RaSTI
- ALcons
- SPL directo

A continuación mostramos, en las figuras 31 y 32, diferentes vistas de la simulación de los andenes de la estación, que es la zona objeto del análisis acústico.

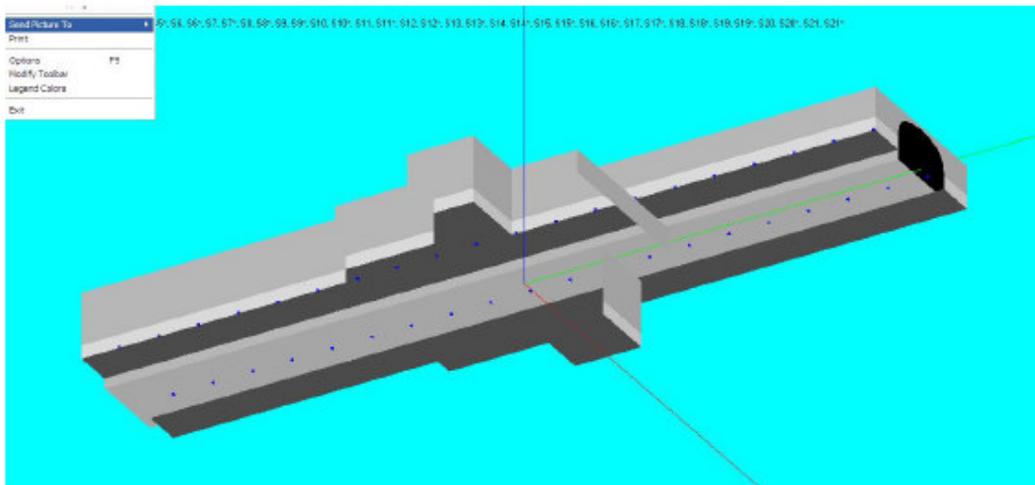


Figura 31 Vista general de la simulación de los andenes con un sistema distribuido

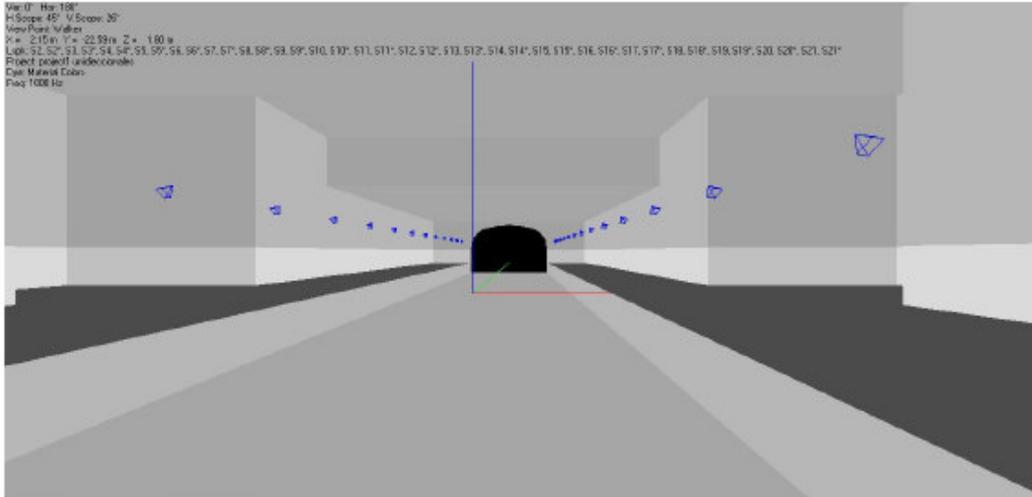


Figura 32 Vista frontal de la simulación de los andenes con un sistema distribuido

En los siguientes apartados se presentan los resultados de las diferentes simulaciones realizadas, en ellas se calculan los índices RaSTI y ALcons así como el nivel SPL. En cada una de las simulaciones se muestra una vista del área a sonorizar con la representación, por colores, de la distribución de cada parámetro por dicho área así como un histograma que recoge la distribución de los valores de cada uno de los índices calculados.

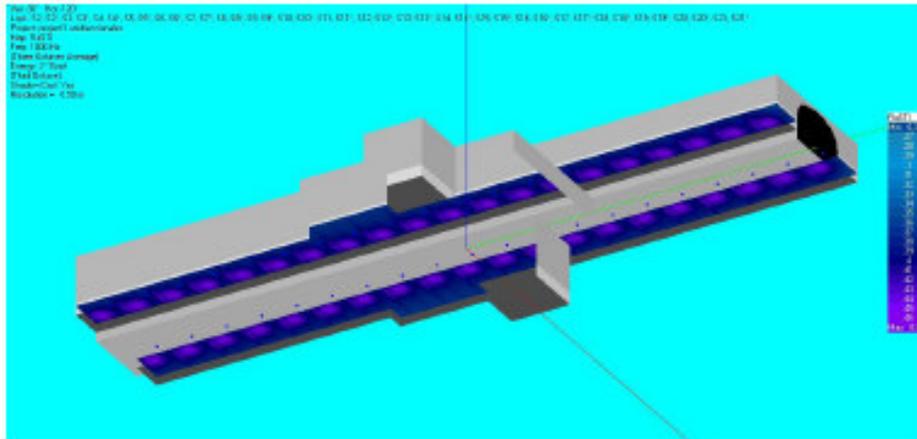
El histograma que se muestra para cada uno de los índices de inteligibilidad muestra en el eje horizontal el valor del índice analizado y en el eje vertical el porcentaje del área sonorizada que tiene dicho valor.

Para las conclusiones de cada apartado se han utilizado los datos arrojados por el histograma y las tablas del apartado 2.3. A partir de estos datos se valora la inteligibilidad en los andenes de la estación.

4.3.1 RaSTI

Analizamos el nivel de inteligibilidad de la estación con el sistema de megafonía tradicional.

4.3.1.1 Sin tren en la estación



4.3.2.1 Sin tren en la estación

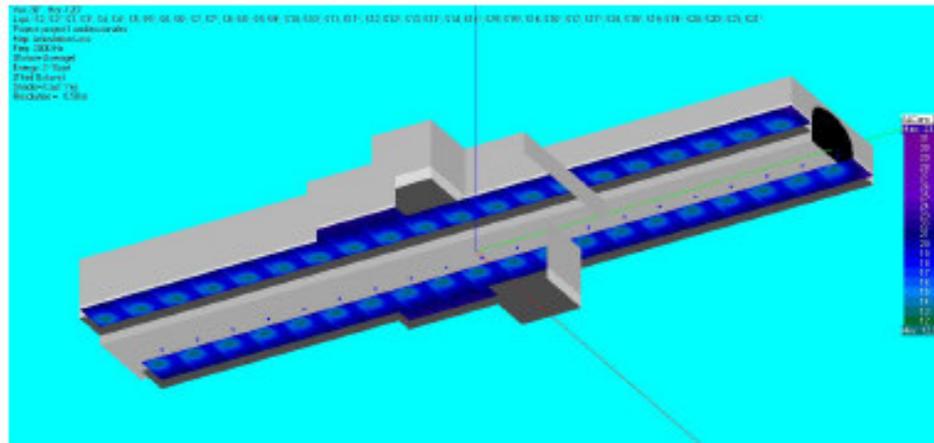


Figura 37 Nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)

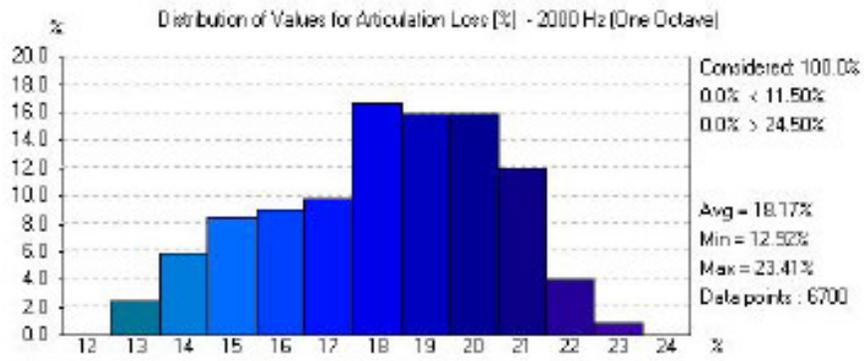


Figura 38 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)

Conclusiones:

Los valores de ALcons están comprendidos entre 13% y 22%, con un valor medio cercano al 18%.

Esto implica una inteligibilidad *pobre* en un 50% de la superficie de los andenes, *inaceptable* en un 32% de la misma y *aceptable* en un 18%.

4.3.2.2 Con tren en la estación

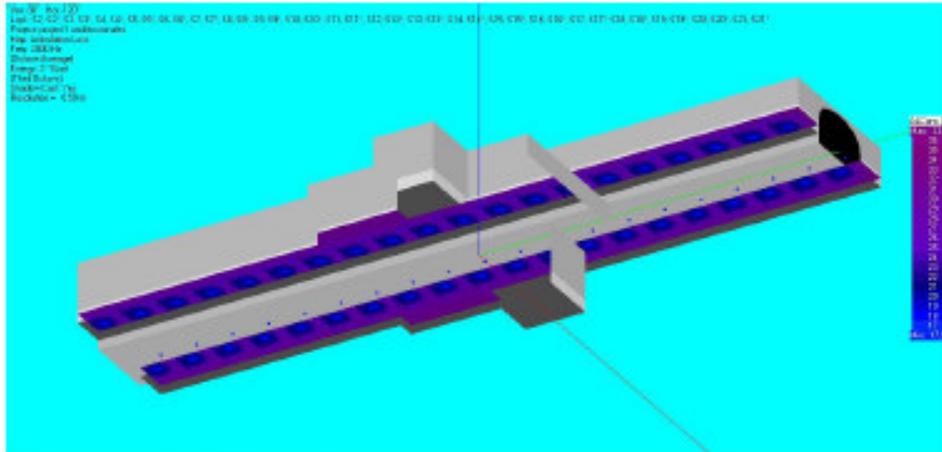


Figura 39 Nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)

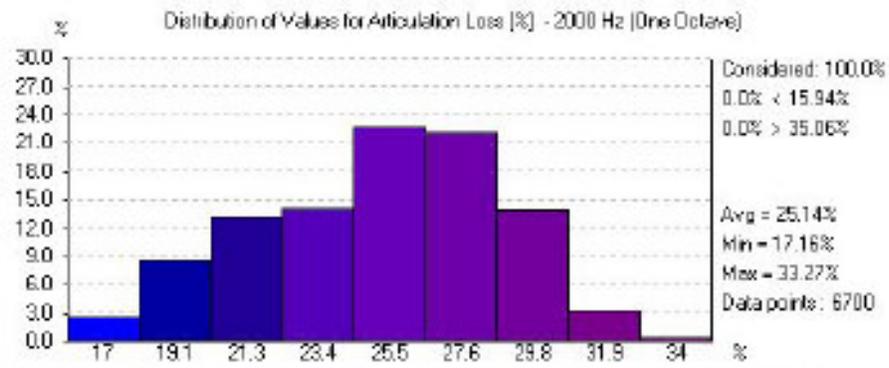


Figura 40 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)

Conclusiones:

Los valores de ALcons obtenidos en el caso en el que la estación tiene un tren en su interior indican una inteligibilidad *inacceptable* ya que por debajo de un 20% de ALcons (calidad pobre) solo se encuentra un 10% del área, el resto de la estación tiene un porcentaje de ALcons insuficiente.

4.3.3 SPL directo

Se presentan los valores de SPL directo en la banda de 1kHz, que es donde mayor cantidad de energía sonora se concentra en la señal de la voz humana. Los niveles de presión sonora se obtienen con los proyectores emitiendo a máxima potencia y sin tren en la estación.

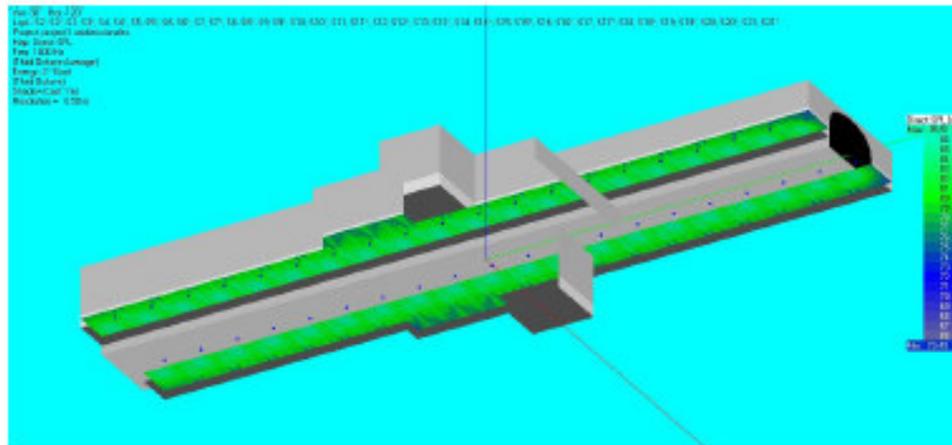


Figura 41 SPL directo en la estación por zonas

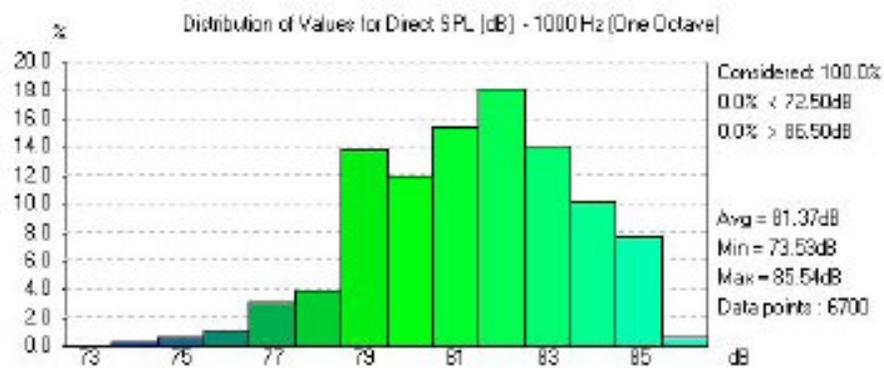


Figura 42 Histograma del SPL directo en la estación por zonas

Conclusiones:

La distribución de SPL a lo largo de los andenes es bastante uniforme (diferencias máximas de 6-7 dB), por lo que no habrá sombras acústicas. Sin embargo, los niveles directos de presión sonora generados no son suficientes para garantizar una adecuada relación señal/ruido cuando el tren hace su aparición en la estación (en condiciones de silencio o con gente en los andenes los niveles podrían ser suficientes).

5 Pruebas y resultados: megafonía directiva

En este apartado presentamos los puntos sonoros que utilizan tecnología directiva. El punto sonoro escogido para sonorizar espacios altamente reverberantes como es la estación objeto de este proyecto es la columna sonora con tecnología de directividad controlable ICONYX de Renkus-Heinz^[10].

Con una columna por andén instalada en sentido vertical es suficiente para conseguir una sonorización adecuada debido a que gracias a la tecnología de directividad controlable que tienen integrada se consigue una gran directividad en el plano vertical y un control total sobre el haz sonoro.

5.1 Altavoces directivos

El punto sonoro escogido para sonorizar espacios altamente reverberantes como es la estación objeto de este proyecto es la columna sonora con tecnología de directividad controlable ICONYX de Renkus-Heinz.

Estas columnas presentan diversas características que le dan un valor añadido con respecto a los puntos sonoros tradicionales.

5.1.1 ICONYX IC Series de Renkus-Heinz

La serie IC de ICONYX es un array directivo en formato columna que combina una muy alta directividad con una reproducción precisa del mensaje reproducido.

ICONYX son columnas acústicas con tecnología de directividad controlable integrada. La columna base (IC-8) cuenta con ocho transductores coaxiales de alta calidad mediante los que se consigue una respuesta en frecuencia completa y una dispersión horizontal ancha. Estos transductores coaxiales (formados por un *woofer* de 4 pulgadas y un *tweeter* de una pulgada) mantienen constante el ancho de cobertura sonora en el plano horizontal para las frecuencias altas del espectro sonoro a diferencia de los puntos sonoros convencionales para los que éste se estrecha.



Figura 43 Transductor de la columna Iconyx

En la figura 44 se presentan dos diagramas polares: el de la izquierda se corresponde con el diagrama polar de un transductor convencional y la figura de la derecha muestra el diagrama polar medido para un transductor co-axial de cuatro pulgadas ICONYX.

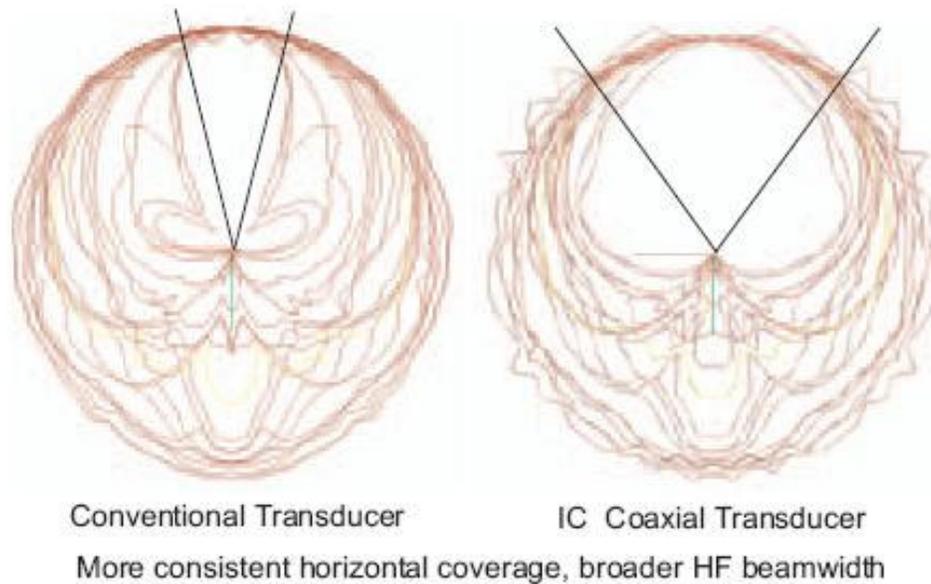


Figura 44 Comparación de diagramas polares de un transductor convencional y uno de la columna Iconyx

Los diagramas polares nos muestran los niveles de presión sonora radiados por el transductor en función de la frecuencia. Las líneas rojas muestran estos niveles de presión sonora obtenidos. Cada línea se corresponde con una banda de frecuencia. En este caso la radiación es la del plano horizontal, es decir, el altavoz está situado en el centro de la imagen y lo estaríamos viendo desde encima (ver la referencia de los ejes de ordenadas).

En las figuras anteriores observamos que en el patrón de un transductor tradicional las líneas polares se estrechan para las altas frecuencias. El patrón del transductor ICONYX es más homogéneo y se observan patrones de directividad muy similares para prácticamente todas las frecuencias.

Esto se traduce en una mayor consistencia del haz sonoro en el plano horizontal de manera que se evita el clásico estrechamiento del haz a altas frecuencias. En el apartado 5.1.2 se verá este problema en detalle.

Cada uno de estos transductores está controlado por un DSP de manera individual y alimentado por un amplificador digital de clase D también de manera individual. Pero las ventajas del uso de DSP no terminan ahí. Estos procesadores permiten además procesar el audio que llega a la entrada de la columna y realizar distintos ajustes y configuraciones que permiten optimizar el rendimiento de la columna sonora en función del recinto en el que se va a emplear.

Estos módulos amplificadores/procesadores DSP D2 tienen las siguientes características:

- Potencia: 50 W RMS por canal y alcanzan hasta 150 W de ráfaga.
- Respuesta en frecuencia: 20 Hz a 20 Khz. (+/- 3dB)
- Distorsión THD: <0.05%
- Ruido y Hum: <100 dB (ponderación A)



Figura 45 Módulo amplificador/procesador de columnas Iconyx

Como ya se ha dicho, todos los elementos que se mencionan en este apartado aparecen integrados en una columna acústica llamada IC-8 fácilmente integrable en cualquier entorno arquitectónico. Dicha columna se compone de ocho transductores que llevan asociados sus amplificadores digitales y procesadores digitales de señal (ocho en total, uno por cada transductor).



Figura 46 Módulo básico IC8

Estas columnas son modulares, es decir, pueden combinarse de manera que forman columnas más grandes que se comportan como un único punto sonoro. Así, podremos unir dos, tres y hasta cuatro IC-8 formando columnas de dieciséis transductores con sus dieciséis amplificadores/procesadores (IC-16), veinticuatro transductores con sus veinticuatro amplificadores/procesadores (IC-24) y treinta y dos transductores con sus treinta y dos amplificadores/procesadores (IC-32).

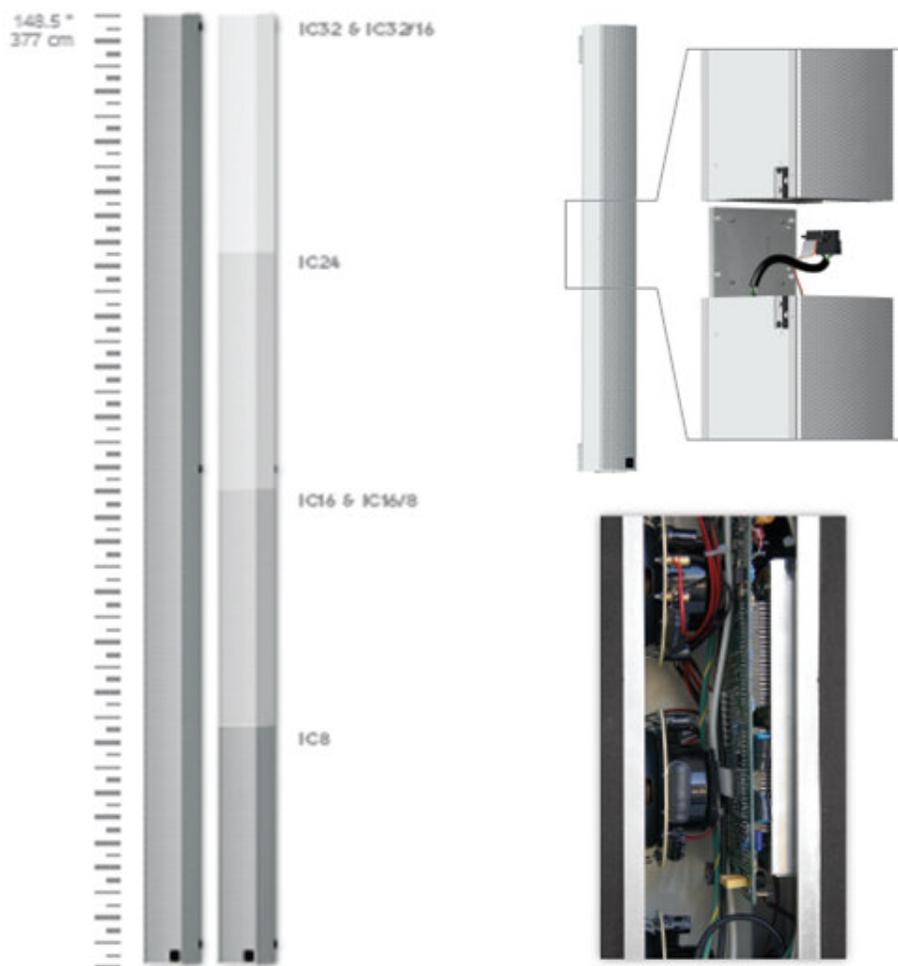


Figura 47 Detalle de la modularidad de las columnas Iconyx

Los distintos módulos IC-8 se comunican internamente, comunicándose entre si tanto alimentación como señales de audio y control. Este diseño modular presenta ventajas:

- Facilidad de transporte. Al ser modular puede optimizarse el espacio al realizar el envío de material. El montaje final podrá realizarse de manera rápida y cómoda en la propia instalación
- Facilidad de mantenimiento. Si un módulo falla, el resto de módulos continuarán funcionando, de forma que el fallo de un módulo no implica quedarse sin sistema. Por ejemplo, si en una instalación tenemos una

columna IC-32 y uno de los módulos resulta dañado, los otros tres módulos IC-8 continuarán funcionando de modo que el tiempo que se tarde en realizar la reparación o el reemplazamiento del módulo dañado, el sistema podrá seguir en marcha.

5.1.2 Tecnología

La asociación de puntos sonoros en sentido vertical formando columnas sonoras posibilita una mayor directividad en este plano. El problema radica en que esta directividad varía en función de la frecuencia de manera que no se tiene control sobre la directividad. La tecnología de directividad controlable que presenta ICONYX soluciona este problema y consigue una directividad estable en todo el rango de frecuencias en el plano vertical.

Hay dos factores que influyen en el control de la directividad de radiación del punto sonoro:

- La longitud de la columna.

El control de la directividad en el plano vertical depende de la longitud de la columna sonora. Así, para obtener una directividad elevada, la longitud de la columna sonora ha de ser mayor a dos veces la longitud de onda del sonido radiado (longitud de la columna $> 2\lambda$). La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia.

En la figura 48 se muestran los diagramas de radiación de una columna a diferentes frecuencias donde podemos apreciar este efecto. Con una longitud de la columna equivalente a $\lambda/2$ la directividad es nula y se observa como a medida que esta longitud aumenta mejora la directividad, alcanzándose una óptima directividad cuando este valor alcanza 4λ .

Por tanto, la dificultad de mantener la radiación de un haz sonoro estrecho aparecerá a frecuencias bajas puesto que son estas frecuencias las que tienen una longitud de onda mayor y dificultan que la columna supere el umbral de 2λ .

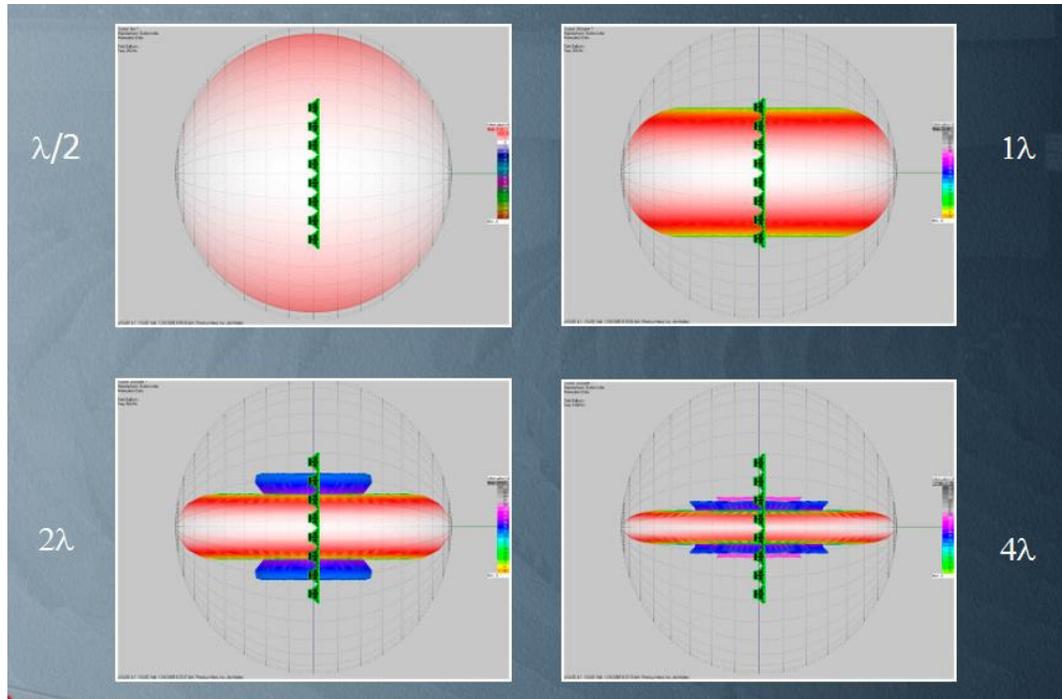


Figura 48 Directividad de la columna en función de la longitud de la misma

La longitud de una columna convencional es fija, por lo que al variar la frecuencia, varía la longitud de onda de la señal y por tanto varía la directividad, a mayor frecuencia mayor directividad.

Para tener un control total de la radiación debemos conseguir que dicha radiación sea constante para todo el rango de frecuencias. La tecnología de directividad controlable utilizada por las columnas ICONYX lo consigue gracias a la tecnología de procesamiento digital de la señal (DSP). Como variar la altura de la columna físicamente en función de las frecuencias radiadas no es posible, los DSP que incorpora ICONYX controlan la radiación de cada transductor. Así, a altas frecuencias no radiarán todos los transductores, lo que equivale a hacer la columna más corta para radiar a altas frecuencias manteniendo su longitud para radiar bajas frecuencias.

➤ Separación entre transductores.

La relación entre distancia de separación entre transductores y longitud de onda de la señal emitida definirá el lobulado de patrón de directividad. El comportamiento ideal es que la columna sonora genere un único lóbulo (lóbulo principal) cuya radiación si podremos controlar. La aparición de más lóbulos provoca que perdamos ese control ya que de las interacciones entre distintos lóbulos pueden producirse cancelaciones de señal y la dirección de radiación de los lóbulos secundarios puede no ser la deseada.

Por esta razón, como podemos observar en la figura 49, la separación entre transductores debe de ser menor a la mitad de la longitud de onda del sonido radiado. Aquí el problema aparecerá en altas frecuencias, ya que son las que se corresponden con las longitudes de onda más cortas. Podemos observar este efecto en la figura 49, donde para valores menores que $\lambda/2$ la directividad es elevada ya que simula tener un único

lóbulo. A medida que la separación de transductores aumenta la directividad va disminuyendo.

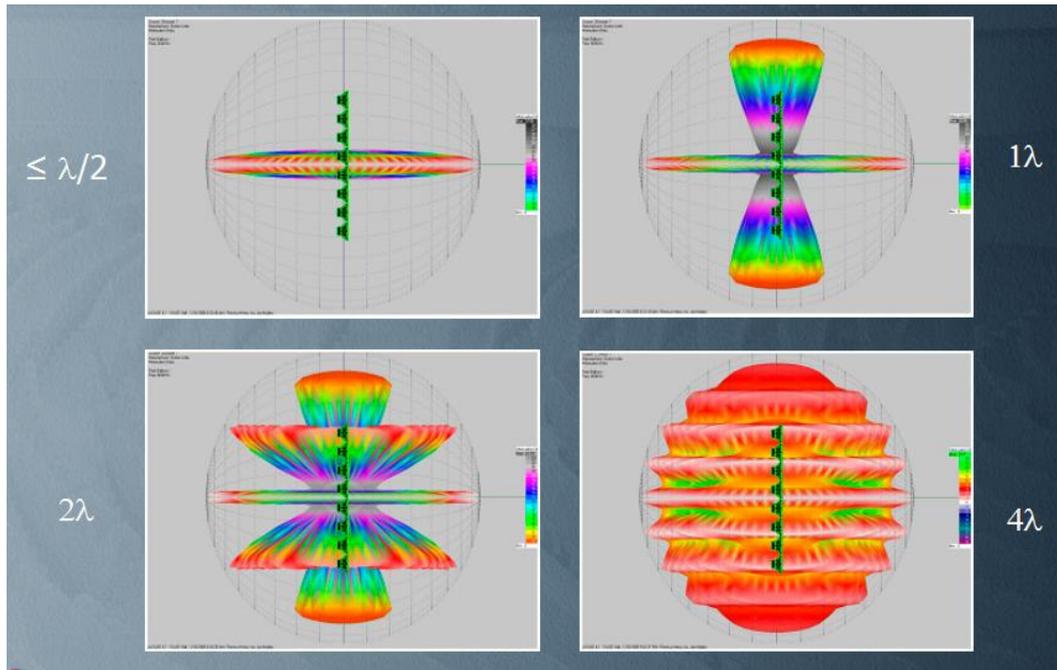


Figura 49 Efecto de la separación entre transductores en la directividad de la columna

De igual modo que explicamos antes, podemos controlar el número y qué de transductores que radian a cada frecuencia. De esta manera acortamos la longitud de la columna a altas frecuencias pero mantenemos la separación mínima entre ellos (haciendo que únicamente emitan los transductores ubicados en el centro de la columna) y mantenemos la longitud de la columna aumentando la distancia entre transductores para bajas frecuencias (haciendo que radien los transductores de los extremos). De esta manera se mantiene constante el ancho del haz sonoro en todo el rango de frecuencias. En la figura 50 se observa gráficamente este efecto.

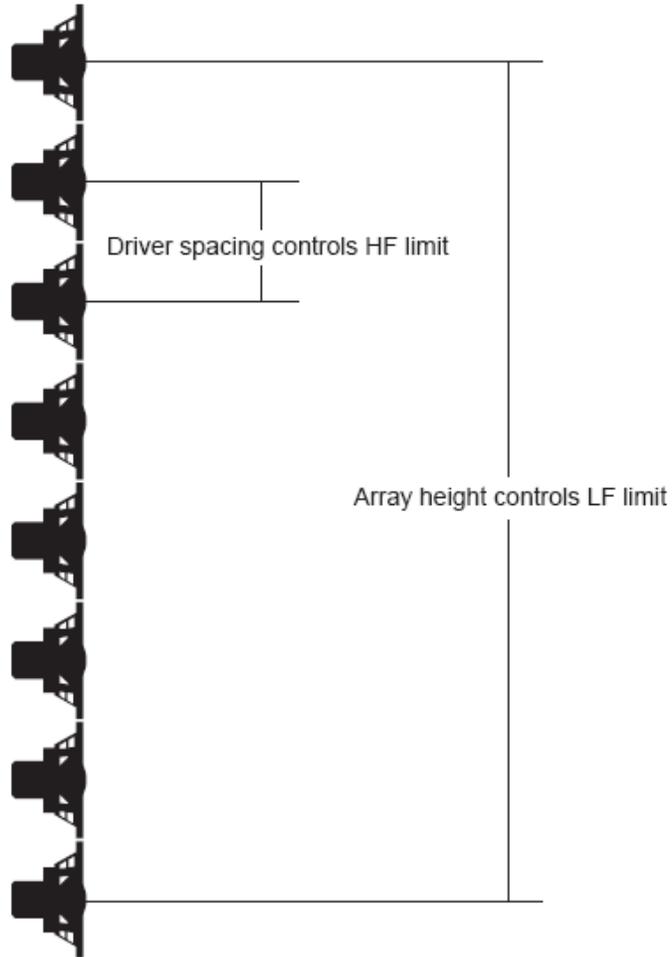


Figura 50 Representación gráfica de la longitud de la columna y separación entre transductores. El espaciado de transductores representa el límite de las altas frecuencias y la altura de la columna el límite de las bajas frecuencias tal y como se explica en este apartado.

Acabamos de describir cómo ICONYX consigue una elevada directividad en el plano vertical (agrupación tipo columna) y cómo consigue mantener esta directividad constante en todo el rango de frecuencias (mediante algoritmos en los DSP).

Además, ICONYX puede dirigir el haz acústico en el plano vertical, de modo que podemos “apuntar” el haz sonoro de la manera que sea más conveniente sin tener que inclinar físicamente la columna. El principio físico que se sigue para lograr esto se ilustra en la figura 51:

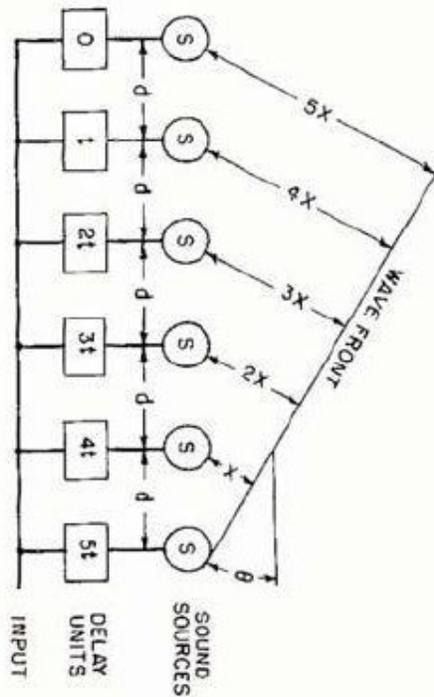


Figura 51 Efecto de diferentes retardos sobre la señal original

Si observamos la figura 51 se aprecia que se retarda cada punto sonoro una cantidad 'x' milisegundos con respecto al punto sonoro inmediatamente inferior. Este retardo será el constante para todos los puntos sonoros y lo que se hará será multiplicarlo por un número entero (2, 3, 4...).

De esta manera variamos la dirección del frente de onda, o lo que es lo mismo, dirigimos el haz sonoro hacia la dirección deseada. En función del valor de retardo x que empleemos conseguiremos un ángulo de variación de la dirección del frente de onda con respecto a la horizontal menor o mayor. El ángulo de apuntamiento del haz acústico con respecto de la horizontal podrá seleccionarse en un rango de valores comprendidos entre +/- 30°. En la figura 52 puede observarse un ejemplo del ángulo del haz acústico, representando el haz en rojo.

Además, gracias al procesamiento mediante DSP podremos controlar el ancho del haz ya que podremos calcular las interferencias entre las radiaciones de los distintos transductores que componen la columna. Así, un módulo IC-8 puede variar el ancho del haz en el plano vertical de 20° a 30°. Este ancho v disminuyendo a medida que la columna se hace mayor y se incorporan más transductores y más DSPs hasta conseguir ancho del haz de hasta 5° con una IC-32.

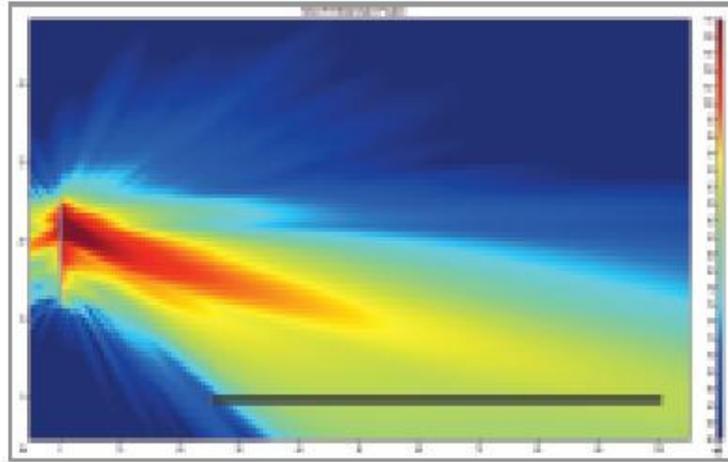


Figura 52 Ángulo del haz acústico

Debido a este control de las cancelaciones entre las radiaciones de los distintos transductores, la tecnología ICONYX es capaz de variar la altura del centro acústico a lo largo de la columna (pudiendo elegir en exactamente que transductor ejercerá de centro acústico) y de generar varios lóbulos diferenciados que se comportarán de forma independiente (es decir, de cada lóbulo podremos seleccionar que transductor ejercerá de centro acústico, apuntarlo hacia donde deseemos y variar el ancho del haz).

5.1.3 Software Beamware

Este software, de la marca Renkus-Heinz, permite simular hasta cuatro haces de sonido para una misma columna IC de ICONYX así como indicarnos la configuración necesaria en la columna para cubrir el área de audiencia deseada.

Mediante este software podemos realizar de manera fácil e intuitiva la configuración de la columna ICONYX en cuestión. En este software podemos seleccionar qué tipo de columna vamos a configurar (IC-8, IC-16, IC-24, IC-32), a qué altura del suelo se encuentra instalada, con qué inclinación con respecto a la vertical, determinar el área de audiencia: número de área de audiencia, longitud, inclinación, a qué distancia de la columna empieza, a qué distancia termina, generar uno, dos o más lóbulos, apuntar dichos lóbulos hacia donde deseemos y variar la altura del centro acústico de cada lóbulo generado. Es decir, nos permite realizar todos los ajustes posibles para conseguir el efecto de radiación más adecuado a las necesidades de nuestra solución.

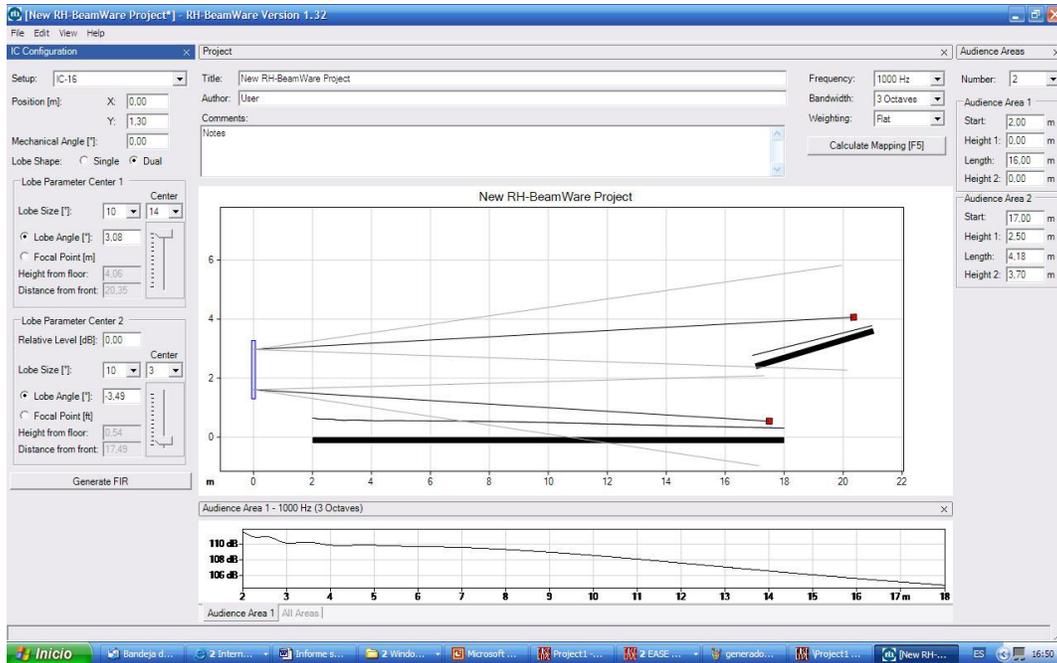


Figura 53 Pantalla del software Beamware donde se deben introducir los parámetros

En la imagen 52 exportada del software Beamware se observan los distintos campos que permiten introducir los datos deseado a fin de realizar las configuraciones antes descritas. Además, es posible simular los niveles de presión sonora que se obtendrán con la configuración hecha, de manera que se hace muy rápido y sencillo el probar las distintas soluciones que se nos vayan ocurriendo.

La imagen 54 muestra un ejemplo un mapa de SPL calculado con el software Beamware.

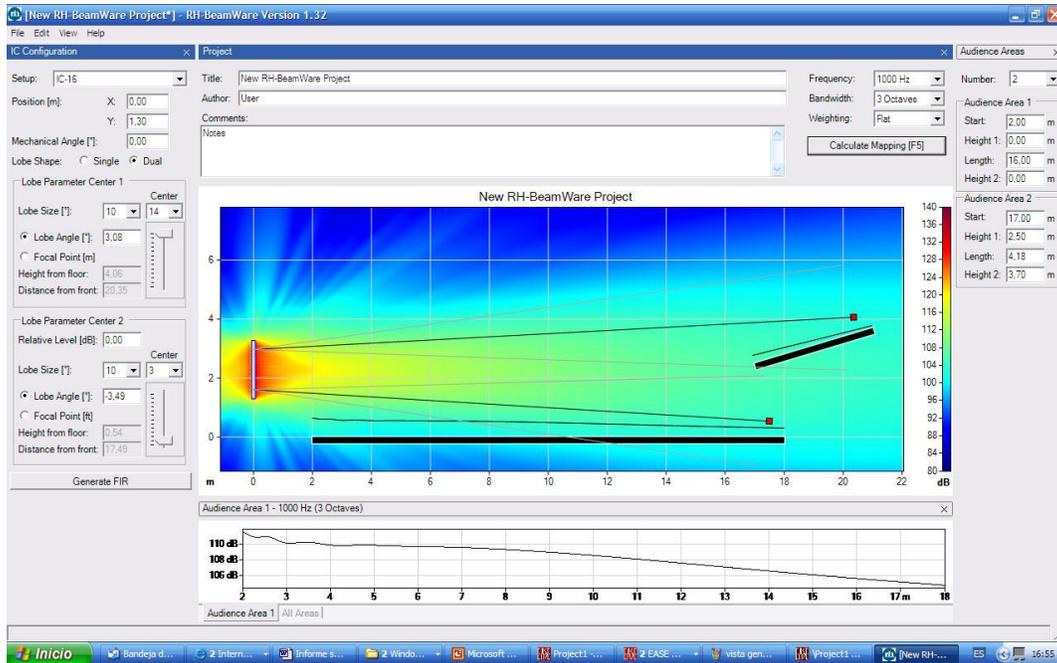


Figura 54 Mapa de SPL calculado con el software Beamware

5.2 Análisis mediante software EASE de megafonía directa

A continuación presentamos los resultados obtenidos en la simulación realizada en EASE 4.1.

El análisis se realizará en ausencia de tren y con tren en la estación para así tener el análisis de todos los casos en los que puede encontrarse la estación.

Analizaremos los siguientes parámetros:

- RaSTI
- ALcons
- SPL directo

Al igual que con la megafonía distribuida, primero se muestran diferentes vistas de la simulación de los andenes de la estación con el software EASE 4.1 en las figuras 55 y 56.

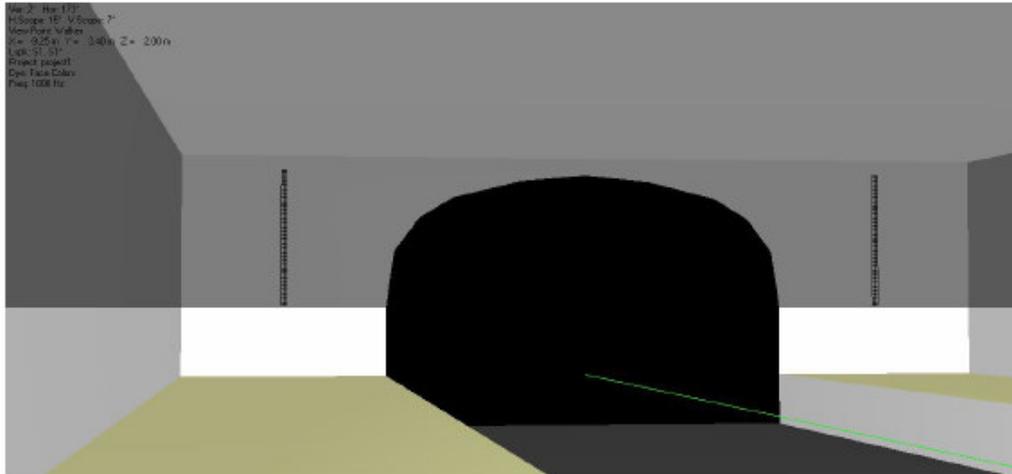


Figura 55 Detalle de la ubicación de las columnas en el andén

En la imagen anterior, se muestra la ubicación de las columnas acústicas en el fondo del andén (una columna por andén).

La perspectiva de la estación desde los altavoces se muestra en la figura 56.

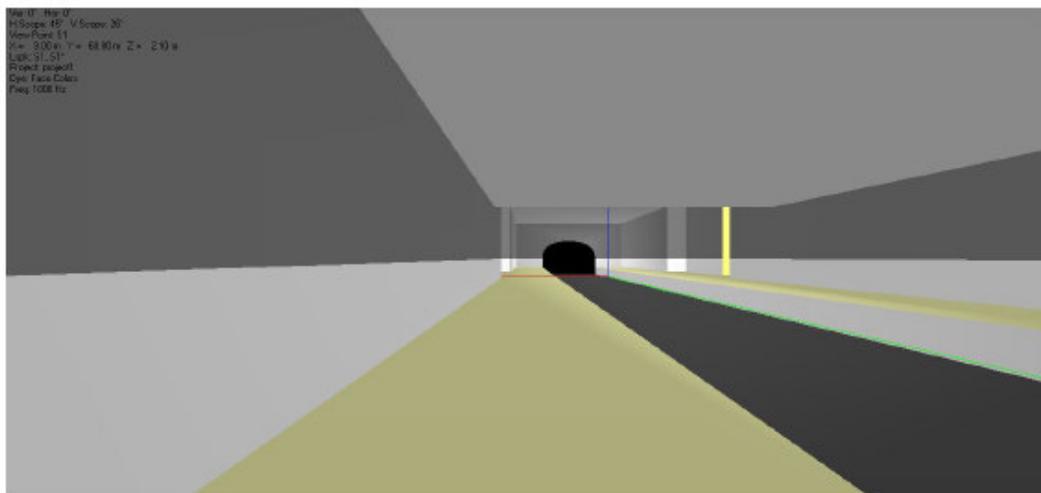


Figura 56 Aspecto de la simulación del recinto a simular

Para analizar los resultados se utiliza el mismo criterio que en el apartado 4.3, los histogramas junto con las tablas del apartado 2.3.

5.2.1 RaSTI

Analizamos el nivel de inteligibilidad de la estación con el sistema de megafonía directiva.

5.2.1.1 Sin tren en la estación

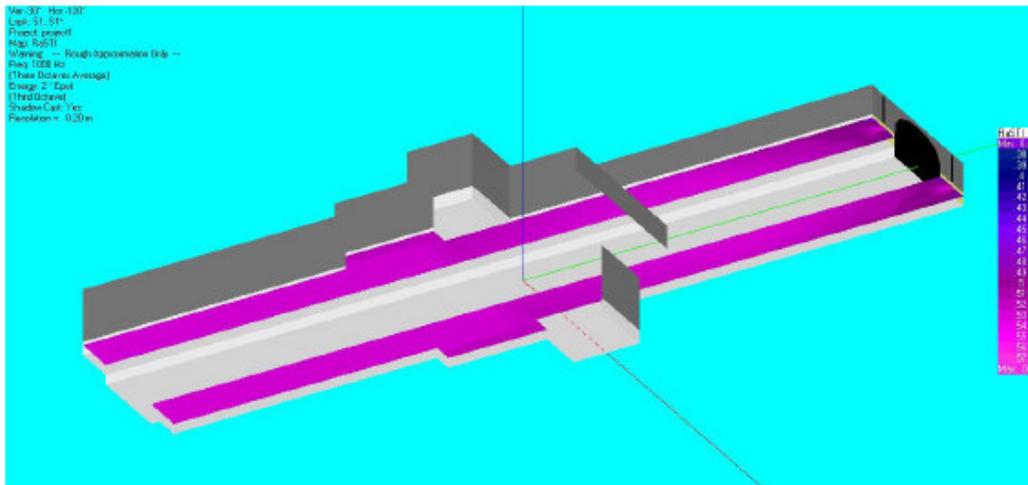


Figura 57 Nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (sin tren en la estación)

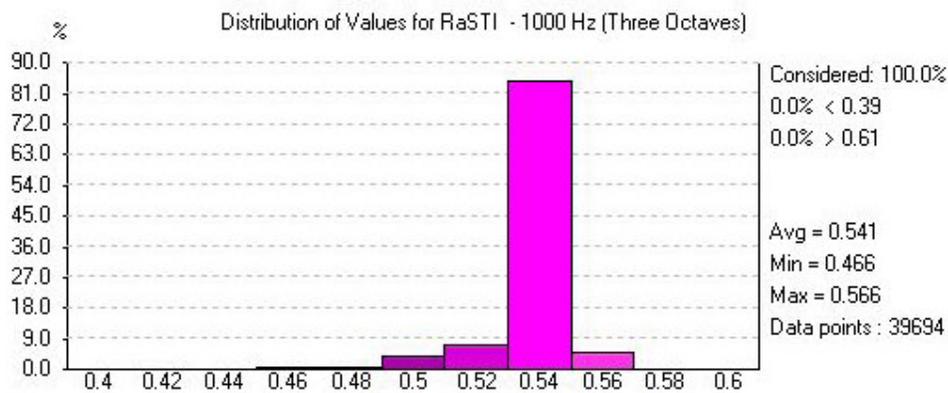


Figura 58 Histograma del nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (sin tren en la estación)

Conclusiones:

Observamos valores de RaSTI muy homogéneos en todo el andén, comprendidos entre 0,47 y 0,57, pero en un 97% de la superficie de audiencia de los andenes los valores de RaSTI estarán comprendidos entre 0,52 y 0,56.

Esto indica una inteligibilidad *aceptable* en todo el área de interés.

5.2.1.2 Con tren en la estación

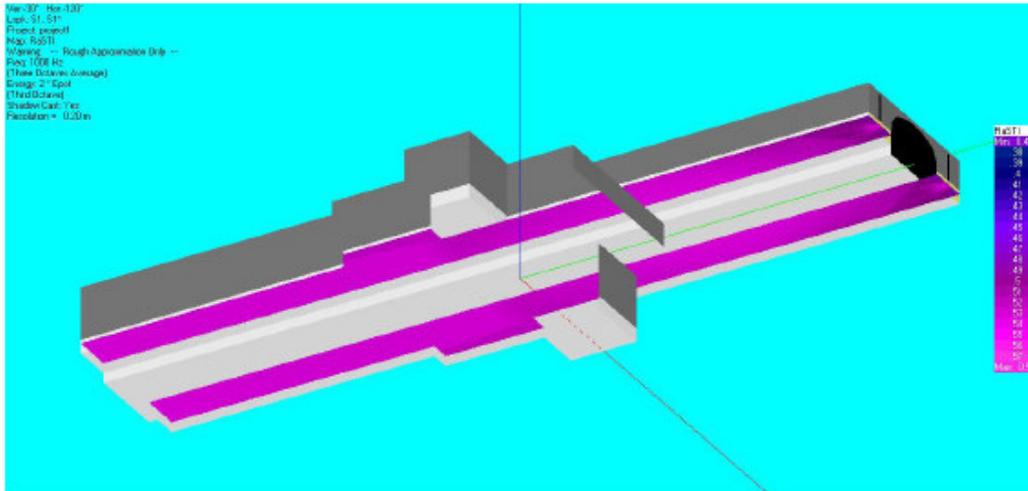


Figura 59 Nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (con tren en la estación)

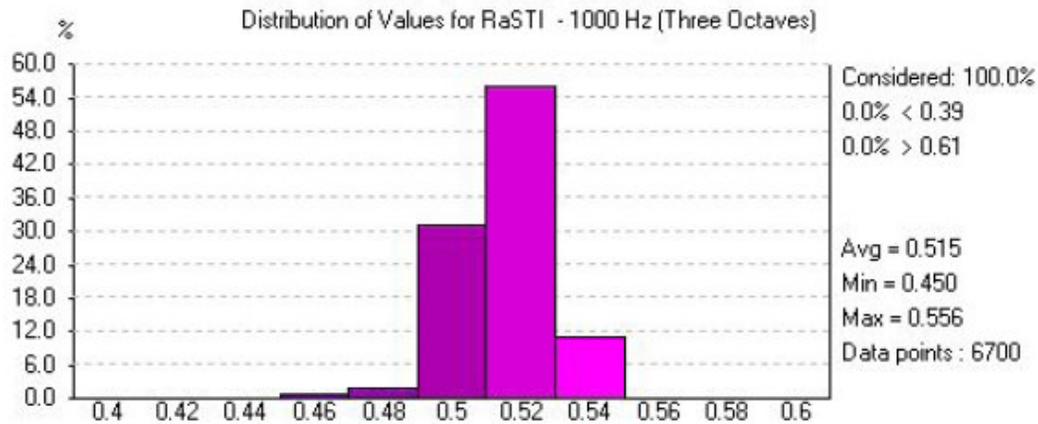


Figura 60 Histograma del nivel de inteligibilidad en la estación por zonas (con tren en la estación)

Conclusiones:

Tenemos valores de RaSTI comprendidos entre 0.45 y 0.55 en toda la superficie del andén de la estación.

El RaSTI obtenido nos indica que la inteligibilidad será aceptable en todo el andén a pesar de condiciones severas de ruido de fondo. Se consiguen mantener los valores de RaSTI en un margen adecuado gracias a que la fuente sonora proporciona suficiente SPL directo para evitar que el ruido de fondo enmascare el mensaje reproducido.

5.2.2 *ALcons*

A continuación analizamos el porcentaje de pérdida en la articulación de las consonantes (ALcons). Los resultados se muestran a continuación:

5.2.2.1 Sin tren en la estación

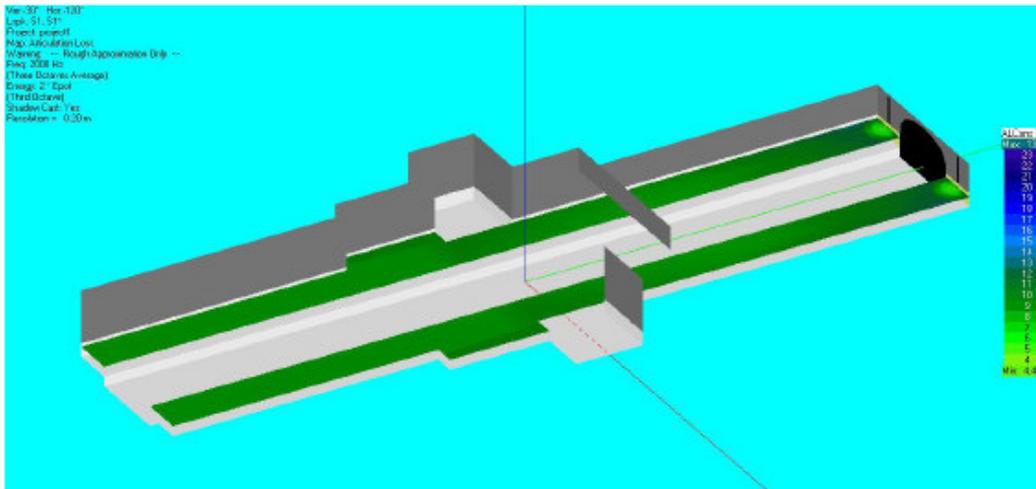


Figura 61 Nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)

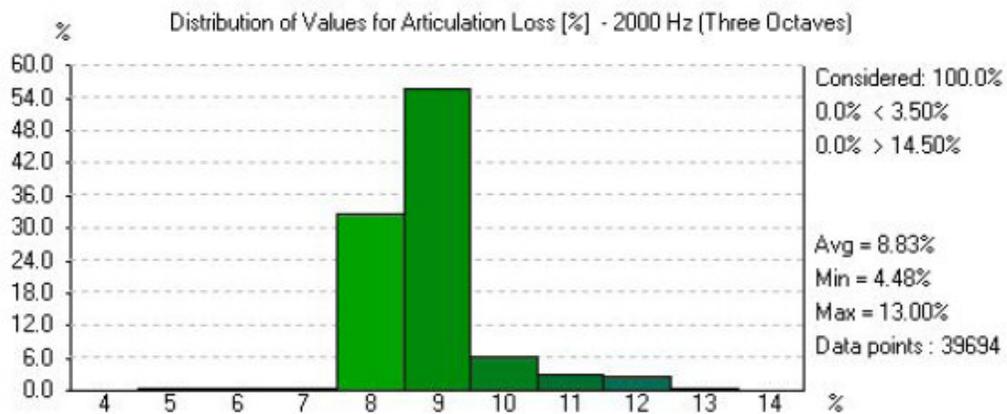


Figura 62 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (sin tren en la estación)

Conclusiones:

Los valores de ALcons oscilan entre el 4,48% y 13% con un valor medio de 8.83%.

En más de un 90% de la superficie del andén estos valores están comprendidos entre el 8% y el 10%, lo cual supone una inteligibilidad *buena*. El 10% de la superficie restante oscila entre valores de ALcons de entre 10% y 13% lo que supone una inteligibilidad *aceptable*.

5.2.2.2 Con tren en la estación

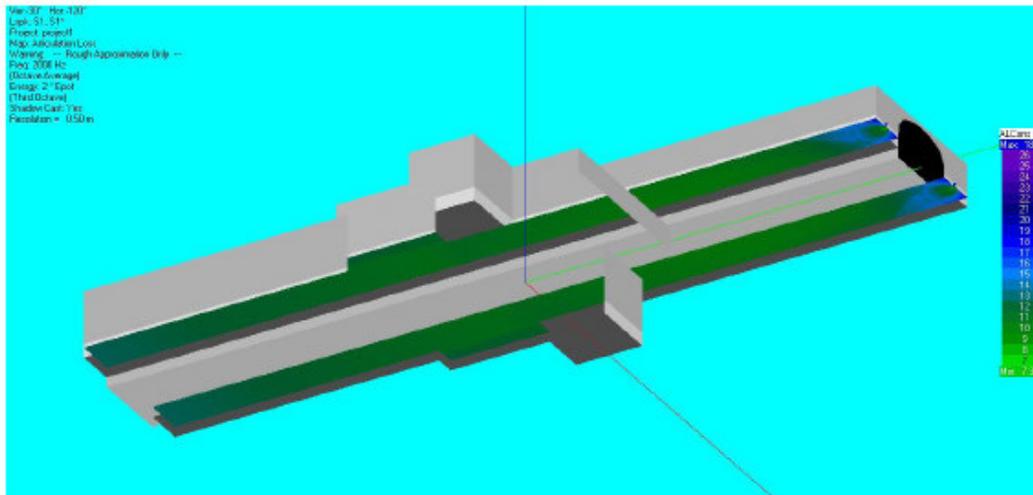


Figura 63 Nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)

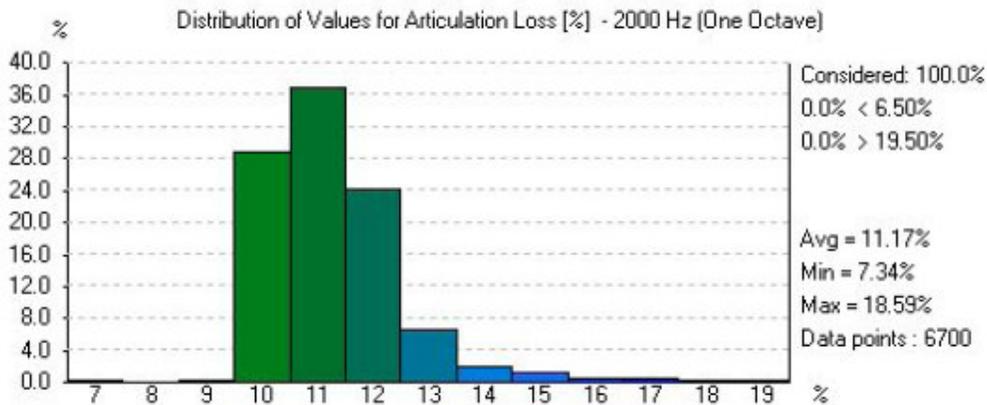


Figura 64 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas (con tren en la estación)

Conclusiones:

Se aprecian niveles de ALcons comprendidos entre el 10% y el 15% en la totalidad de los andenes. Por tanto el nivel de inteligibilidad será aceptable a pesar de tener unas condiciones de ruido muy severas.

5.2.3 SPL directo

Se presentan los valores de SPL directo en la banda de 1kHz, que es donde mayor cantidad de energía sonora se concentra en la señal de la voz humana.

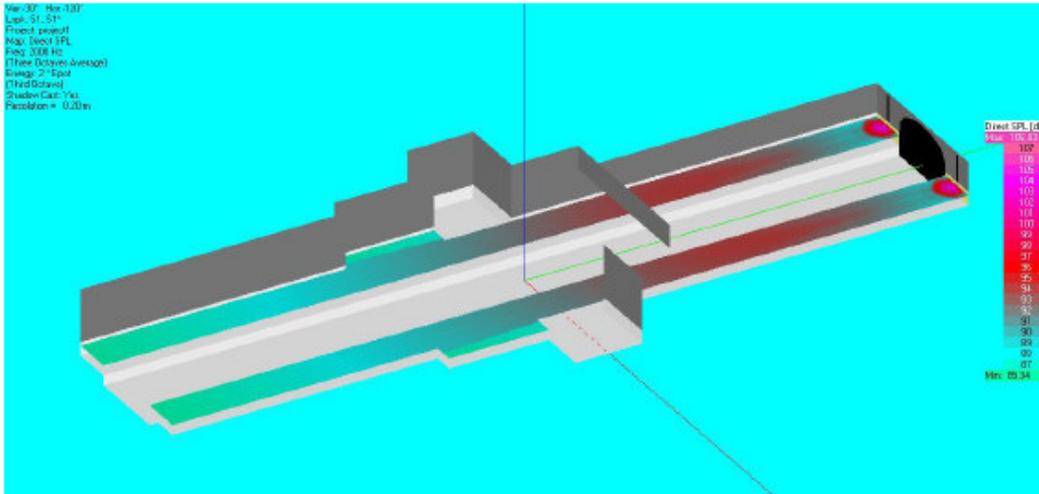


Figura 65 Nivel de SPL directo en la estación por zonas

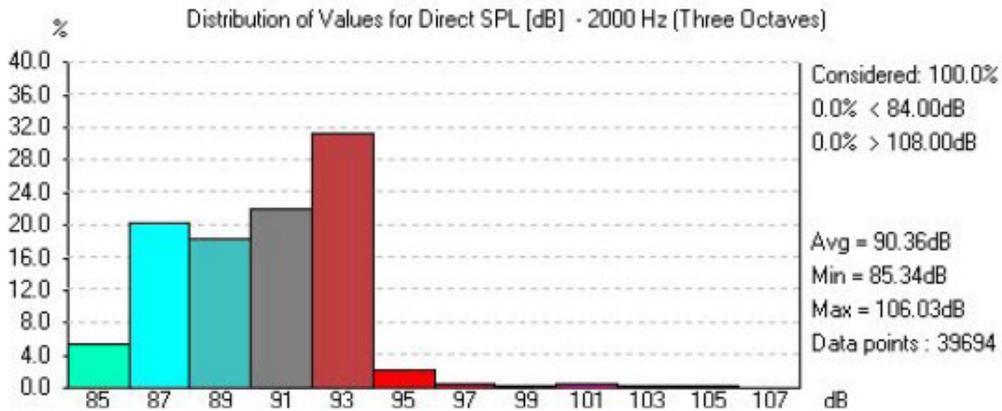


Figura 66 Histograma del nivel de ALcons en la estación por zonas

Conclusiones:

Observamos diferencias de SPL directo máximas 6 dB en un 95% de la superficie de los andenes. El valor máximo que aparece en la distribución (106,03dB) corresponde a menos de un metro de distancia de la columna, que por tratarse de campo cercano no es tenido en cuenta.

Las columnas no han sido empleadas en esta sonorización a su máximo nivel. Podríamos obtener niveles más elevados. Lo que nos interesa demostrar es la gran homogeneidad de niveles conseguidos en toda la estación, que tiene una longitud de 120 metros.

6 Conclusiones del estudio de ambas megafonías

En los apartados anteriores hemos realizado un estudio de dos posibles soluciones para sonorizar los andenes de una estación subterránea, megafonía tradicional o megafonía directiva. Como consecuencia de ese estudio se ha llegado a unas conclusiones que nos servirán para decidir cuál de las soluciones es la óptima para la sonorización del recinto.

Como se ha comprobado mediante análisis acústicos con la herramienta EASE 4.1, las condiciones de la estación hacen la sonorización de la estación complicada. Con la solución tradicional distribuida empleando proyectores sonoros convencionales no es posible alcanzar niveles de calidad de la señal emitida aceptables. Todo esto hace necesario un elevado control de la energía sonora radiada.

Las dos principales razones por las que la megafonía tradicional no es una solución óptima para este recinto son:

- El empleo de puntos sonoros que no sean directivos provoca que excitemos el campo reverberante, que en un recinto de estas condiciones hace que la escucha sea crítica.
- Por otro lado, es importante tener control sobre la directividad del haz sonoro, ya que al ser un recinto de sección rectangular la aparición de ecos molestos es muy probable debido a:
 - Paredes paralelas: Posibilidad de aparición de ecos.
 - Grandes dimensiones del recinto: Los ecos pueden haber recorrido grandes distancias sin atenuarse demasiado ya que han podido sufrir únicamente un rebote con una superficie, de forma que le llegarán al oyente con nivel y retardo suficientes para causar molestia.

Además de estos motivos a continuación se exponen las principales ventajas de las columnas de directividad controlable frente a un sistema de megafonía tradicional:

- **Consideraciones tecnológicas:** Estas columnas integran en su diseño la tecnología de directividad controlable mediante DSP, lo que permite dirigir el haz acústico a una zona determinada, variar el ancho del haz acústico, desplazar el centro acústico de la columna a través de la longitud de la misma y generar varios centros acústicos, con ajustes particulares para cada uno de los haces sonoros generados.
- **Consideraciones acústicas:** Gracias a la tecnología de directividad controlable se consigue que la columna sea extremadamente directiva en el plano vertical, lo que posibilita su uso en recintos altamente reverberantes como es el caso de los andenes de la estación.

El uso de altavoces directivos ayuda a disminuir el campo reverberante ya que se focaliza la energía sonora hacia la zona de audiencia de manera que llegue

directamente a los oyentes, minimizándose las reflexiones sonoras con las superficies que delimitan el recinto.

- **Consideraciones eléctricas:** Las columnas son autoamplificadas y cada driver es alimentado por un amplificador digital, lo que posibilita un excelente rendimiento en la radiación de cada transductor consiguiendo niveles de presión sonora más elevados.
- **Consideraciones funcionales:** Las columnas son gestionadas, programadas y monitorizadas mediante software a través de protocolo TCP/IP. Es decir, que podemos realizar la configuración de cada DSP y el control de estados de cada amplificador de manera centralizada a través de un PC. Además, gracias a los procesadores digitales de señal que incorpora la columna, podemos realizar ajustes de la señal de audio internamente en la columna: ecualización, filtrado y control de volumen.
- **Consideraciones estructurales:** Al ser columnas autoamplificadas evitamos el uso de etapas de potencia externas con el consiguiente ahorro de cableado y espacio en rack y sala de equipos.
- **Consideraciones de mantenimiento:** ICONYX es un sistema modular, en el que se pueden unir varias columnas para formar una columna mayor que funciona como un todo. Además, el mal funcionamiento de una columna no impide el funcionamiento del resto de los módulos que forman el conjunto, con lo que el sistema podría seguir funcionando hasta que se realice el reemplazamiento de la averiada.
- **Consideraciones arquitectónicas:** Este tipo de columnas consiguen una gran integración con el entorno, quedando prácticamente ocultas a la vista y sin provocar un impacto visual negativo en el recinto.

6.1 Solución propuesta

Como resultado de todos los estudios y análisis realizados a continuación se describe la solución óptima para la sonorización del recinto de los andenes de la estación.

6.1.1 Esquema de la propuesta

En la figura 67 se muestra un esquema de la solución de megafonía propuesta:

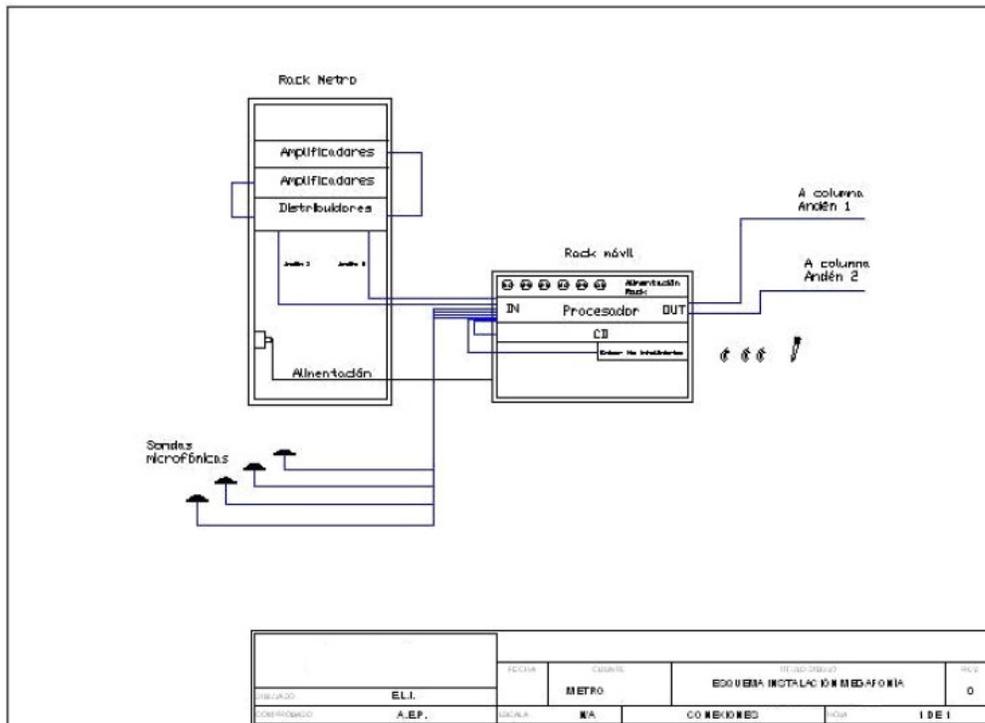


Figura 67 Esquema de la solución propuesta

A la vista de las conclusiones extraídas del estudio, la solución adoptada se apoya en las siguientes ventajas clave que nos sirven de base para la toma de decisión sobre qué solución de sonorización emplear.

Sistema centralizado contra distribuido

Se opta por un sistema centralizado frente el sistema distribuido, que emplea un elevado número de proyectores convencionales porque de esta forma se evitan las cancelaciones sonoras por diferencias de fase entre el sonido emitido por los distintos puntos sonoros. Con un sistema centralizado como el propuesto, la radiación de energía sonora se realiza en fase, por lo que se evita este problema.

Otra solución para paliar este problema es el uso de retardos electrónicos entre puntos sonoros, pero en una solución distribuida que emplea un gran número de puntos sonoros habría que disponer de un canal independiente para cada uno de ellos, lo cual es prácticamente inviable.

Control de la directividad

El empleo de un sistema centralizado para cubrir andenes con longitudes grandes genera un problema: los puntos cercanos al altavoz reciben niveles mucho más elevados que los puntos más lejanos al mismo. Esto implica que si queremos entregar la ganancia necesaria para que el sonido que llega a los puntos más alejados tenga nivel suficiente, estaremos entregando demasiado nivel de presión sonora en los puntos cercanos al altavoz (causando molestia al oyente). En caso contrario, si ajustamos la ganancia para que el nivel cerca del altavoz sea adecuado, tendremos poco nivel en los puntos lejanos.

Por este motivo necesitamos un punto sonoro extremadamente directivo. Con ICONYX logramos una directividad de hasta 5° en el plano vertical.

Esto se traduce en una diferencia de SPL directo de únicamente 6 dB para andenes de 120 metros de largo

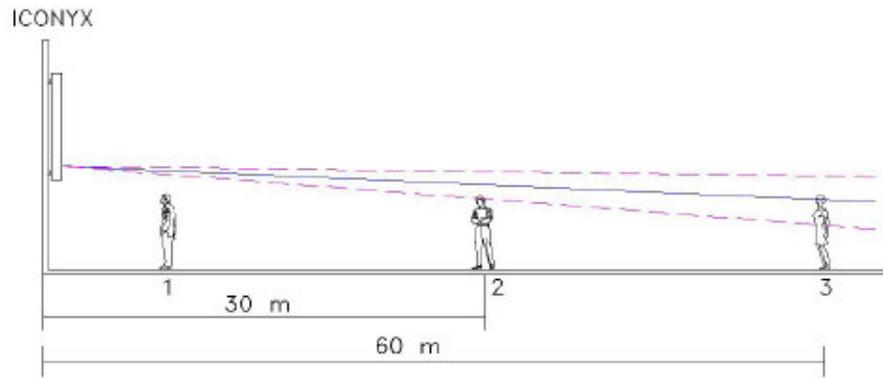


Figura 68 Oyentes en el área de sonorización

Si consideramos los puntos 2 y 3 de la figura 68 y comparamos los niveles de presión sonora que llegan a un oyente en cada uno de ellos, observaremos los siguientes efectos:

- Debido a la diferencia de distancia al punto sonoro entre los dos puntos, los niveles de presión sonora difieren en 6 dB. Esto es así porque el SPL radiado por el punto sonoro altavoz cae 6 dB al doblarse la distancia.
- Por otro lado, tiene lugar un efecto contrario debido al patrón de directividad del punto sonoro. Así, la línea azul representa el eje de radiación del altavoz y las líneas magenta representan la línea de cobertura sonora de -6 dB. Es decir, en el punto 2 habrá 6 dB menos que en el punto 3 debido al patrón de directividad de la columna ICONYX.

Los dos aspectos se manifiestan de forma simultánea, produciendo efectos contrarios, con lo que idealmente, a pesar de existir una distancia de 30 m entre los dos puntos, los niveles de presión sonora en los mismos son similares.

Por otra parte, el viajero que esté ubicado en el punto 1 (junto al altavoz) no percibirá nivel excesivo debido a la altísima directividad de la columna. El eje del haz sonoro se dirige hacia el punto del andén más alejado de la columna sonora para que las pérdidas de nivel en este punto se deban únicamente a la distancia y no a la directividad.

Al ser el haz sonoro tan estrecho, en puntos cercanos a la columna, donde no existen apenas pérdidas debidas a la distancia, las pérdidas debidas a la directividad compensarán este hecho. De esta manera se consiguen variaciones de nivel directo mínimas en los diferentes puntos del andén.

Tecnología DSP

La tecnología DSP integrada en las propias columnas acústicas nos permite optimizar los resultados obtenidos en la sonorización. La posibilidad de realizar ajustes de ecualización, filtrado (es muy importante no radiar frecuencias por debajo de 150 Hz, ya que a estas frecuencias cualquier fuente sonora se comporta de modo omnidireccional, por lo que perderíamos el control sobre la directividad. Por otra parte, la señal hablada apenas tiene energía en este rango de frecuencias), control de la dirección de apuntamiento del lóbulo, etc.

El control del apuntamiento del lóbulo es importante ya que podremos orientarlo de manera que se minimice la aparición de ecos molestos. Por tanto, la solución adoptada será la colocación de una columna ICONYX (IC-32) por andén.

No es posible emplear una sola columna para ambos andenes ya que el tren actuará de barrera acústica ente ellos.

Esta solución tiene un valor añadido desde el punto de vista arquitectónico, ya que es perfectamente integrable con el entorno, de forma que el impacto visual que causa en el viajero es mínimo.

El empleo de una matriz digital que incorpore DSP nos permite, no sólo el poder contar con un sistema de control automático de ganancia eficaz, sino el contar con innumerables posibilidades de ajuste y adecuación de la señal de audio: ecualizadores paramétricos de 32 bandas, compresores, puertas de ruido, filtros shelving, etc que permitirán optimizar el rendimiento del sistema y acomodar la señal a ese recinto determinado que es el de los andenes de la estación de metro.

Por otra parte, otro avance importante es que un procesador digital permite aplicar retardos a cada canal de salida independientemente, de forma que podemos compensar los retardos físicos que se producen en la radiación de sonido por parte de dos fuentes sonoras separadas entre si en el espacio, con retardos electrónicos. Esto nos permite corregir el desfase de la señal radiada y evitar los problemas antes comentados en el apartado 4.2: cancelación de señal y filtro peine.

Control Automático de Ganancia (CAG)

Frente a un sistema estático donde el nivel de los mensajes emitidos sea siempre el mismo, el empleo de control automático de ganancia (CAG) consigue que el nivel de presión sonora emitido se ajuste dinámicamente en función del ruido de fondo captado en el recinto por las sondas microfónicas instaladas. Así, se consigue mantener una relación señal/ruido adecuada sin que, en momentos de menor ruido de fondo, pueda resultar excesivo el nivel de presión sonora emitido por el sistema, causando molestias a los viajeros.

Para ello se han colocado sondas microfónicas modelo c562CM de la marca AKG con el objetivo de medir el sonido ambiente presente en la estación. Según esto, se implementará un control automático de ganancia en función del ruido de fondo captado en la zona a sonorizar. Para ello, en cada andén se han ubicado dos sondas encima de las luminarias. Cada una de las sondas se ha cableado hacia el cuarto de comunicaciones.



Figura 69 Imagen de sonda microfónica a utilizar en este proyecto

Las señales captadas por las sondas se conectan a entradas del procesador (una por sonda). El procesador ajusta de forma automática la ganancia de la señal disponible en los canales de salida (dirigidos a las columnas) en función de los niveles de ruido de fondo recogidos a sus entradas.

La solución descrita cuenta con equipos que serán instalados en el cuarto de comunicaciones de la estación y en los andenes. A continuación describimos en detalle el equipamiento y su ubicación.

6.1.1.1 Cuarto de comunicaciones

Como muestra la figura 70, en el cuarto de comunicaciones de la estación existe un rack dedicado exclusivamente al sistema de megafonía en el que se encuentran los siguientes equipos:



Figura 70 Imagen del cuarto de comunicaciones de la estación

En la figura 71 vemos los siguientes elementos:

- **Matriz de audio:** se encarga de enviar la señal de audio a las diferentes zonas de la estación: vestíbulo, andén 1 o andén 2.

- **Etapas de potencia:** amplifican la señal proveniente de la matriz antes de enviarla a los puntos sonoros.

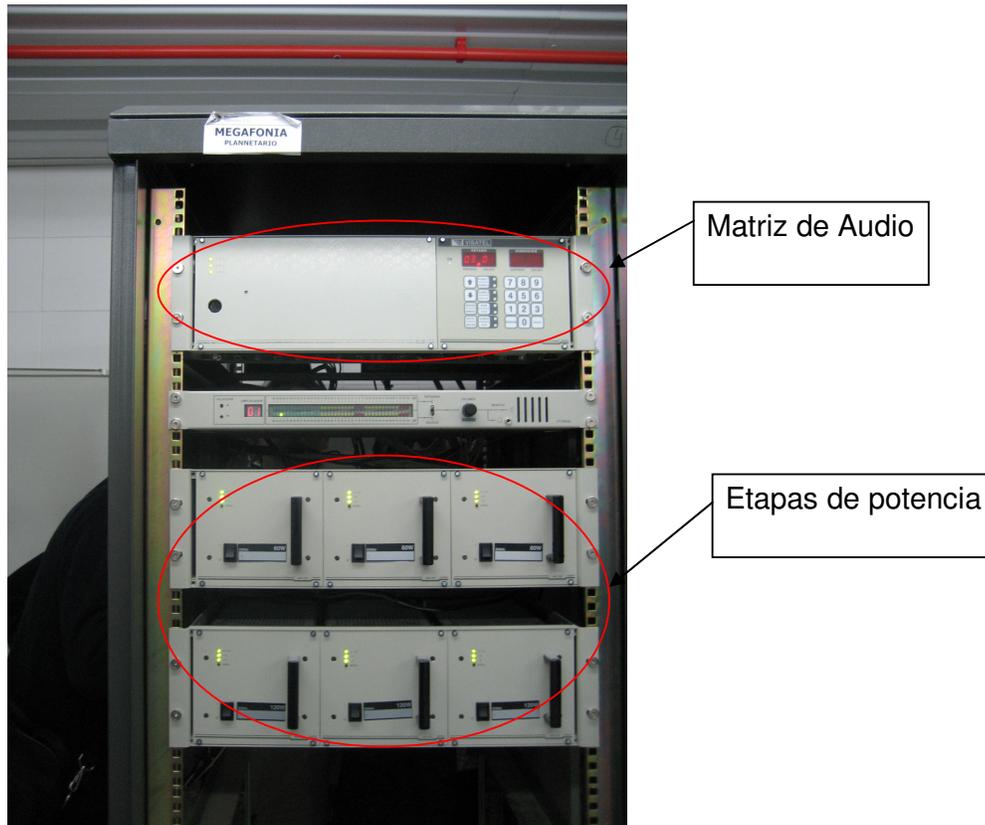


Figura 71 Detalle de la matriz de audio y las etapas de potencia del rack de megafonía

En la figura 72 vemos:

- **Distribuidor de audio:** Equipo instalado para poder contar con la misma señal de entrada tanto en el sistema de megafonía tradicional instalado previamente como en el sistema nuevo.



Figura 72 Imagen del distribuidor de audio

- Un procesador de audio modelo BLU-16 de la marca BSS Audio (que se muestra en la figura 73) que tiene como entradas:
 - Señal de las cuatro sondas (entradas 1, 2, 3 y 4),
 - Señales de audio proveniente del sistema de megafonía del cliente, a través del distribuidor de audio ya instalado (entradas 7 y 8),
 - Reproductor de CDs (entrada 5) y
 - Micrófono inalámbrico (entrada 6).

y como salidas las dos señales de audio correspondientes a cada una de las columnas (salidas 1 y 2).



Figura 73 Imagen del procesador de audio

- Un reproductor de CDs de la marca Denon modelo dn-c640. Mostrado en la figura 74.



Figura 74 Imagen del reproductor de CDs

- Un micrófono inalámbrico modelo SKM 165 G2 de la marca Sennheiser con su equipo emisor desde el cual podemos emitir mensajes de voz. Mostrado en la figura 75.



Figura 75 Imagen del micrófono inalámbrico

Este rack se alimenta de una toma de corriente existente en el cuarto de comunicaciones.

6.1.1.2 Andenes

En cada uno de los dos andenes de la estación se ha instalado:

- Una columna de directividad controlable Iconyx IC-32
- Dos sondas microfónicas, situadas sobre las luminarias de la estación.

6.2 Trabajo futuro

Este proyecto se ha centrado únicamente en la sonorización de los andenes de la estación (por petición expresa del cliente). Como trabajo futuro, el proyecto podría ampliarse incluyendo la sonorización del resto de zonas de la estación: entreplanta, vestíbulo, ascensores, taquilla y cuartos técnicos.

7 Bibliografía

- [1] Luis I. Ortiz Berenguer. *Refuerzo sonoro. Bases para el diseño*. Dpto. de Publicaciones de la E.U.I.T. de Telecomunicación. 1998.
- [2] Antoni Carrión Isbert. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC. 1998.
- [3] Don Davis, Eugene Patronis, Jr. *Sound System Engineering 3rd Edition*. Focal Press. 2006.
- [4] Gary Davis, Ralph Jones. *Sound Reinforcement Handbook 2nd Edition*. Hal Leonard Publishing Corporation. 1989.
- [5] Herman J.M. Steeneken, Tammo Houtgast. *Basics of the STI measuring method*. www.steeneken.com
- [6] Kenneth D. Jacob. *Correlation of Speech Intelligibility Tests in Reverberant Rooms with Three Predictive Algorithms*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 37, No. 12, December, 1989.
- [7] R.H. Bolt, P.E. Doak. *A Tentative Criterion for the Short Term Transient Response of Auditoriums*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 22, issue 4, p. 507. 1950
- [8] V.M.A. Peutz. *Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room*. J.Audio Eng. Soc.,vol. 19, pp. 915-919. Diciembre 1971.
- [9] W. Klein. *Articulation Loss of Consonants as a Basis for the Design and Judgement of Sound Reinforcement Systems*. J.Audio Eng. Soc.,vol. 19, pp 920-922. Diciembre 1971.
- [10] Documentación del fabricante Renkus-Heinz. <http://www.rh.com/>

8 Anexo A – El decibelio (dB)

El decibelio (dB) describe siempre una relación de dos magnitudes que suelen estar relacionadas con la potencia. La razón por la cual se utilizan los decibelios es por su naturaleza logarítmica lo cual proporciona números más manejables que una relación natural. Además las propiedades matemáticas de los logaritmos hacen que la ganancia total de un sistema de muchos componentes puede ser calculada de manera sencilla sumando las ganancias de los componentes individuales. Esto es por:

$$\log(A \times B \times C \times \dots) = \log(A) + \log(B) + \log(C) + \dots$$

Un decibelio es la décima parte de un Belio (unidad llamada así debido a Alexander Graham Bell, razón por la que la “B” en dB es en mayúscula). Un Belio se define como el logaritmo de una relación eléctrica, acústica o de cualquier otro tipo de potencia. Para expresar la relación de dos valores de potencia P_0 watos y P_1 watos, en Belios:

$$\text{Bel} = \log(P_1 + P_0)$$

El dB es más conveniente para sistemas de sonido porque tiene una escala más natural ya que sensibilidad del oído humano es también logarítmica. Como hemos comentado antes un dB es una décima parte de un Belio, por tanto:

$$\text{dB} = 10 * \log(P_1 + P_0)$$

Dos puntos importantes en el uso del dB son:

- Cuando el valor de una potencia es el doble que la otra, supone un aumento de 3 dB (y si es la mitad, 3 dB menos).
- Cuando el valor de una potencia es 10 veces el valor de la otra, supone un aumento de 10 dB (y si es 1/10 son 10 dB menos).

Si usamos un valor de referencia de 1 W para P_0 entonces obtenemos los resultados en dB de la figura 77.

| Power Value of P_1 (Watts) | Level in dB (Relative to 1 Watt P_0) |
|------------------------------|---|
| 1 | 0 |
| 10 | 10 |
| 100 | 20 |
| 200 | 23 |
| 400 | 26 |
| 800 | 29 |
| 1,000 | 30 |
| 2,000 | 33 |
| 4,000 | 36 |
| 8,000 | 39 |
| 10,000 | 40 |
| 20,000 | 43 |
| 40,000 | 46 |
| 80,000 | 49 |
| 100,000 | 50 |

Figura 76 Valor en Wattios y en dB

Viendo la tabla se aprecia el valor del uso del dB ya que una diferencia de 50 dB denota una relación de 100000:1.

El dBm

El término dBm es una unidad de medida utilizada para expresar la potencia absoluta mediante una relación logarítmica. El dBm se define como el nivel de potencia en decibelios en relación a un nivel de referencia de 1 mW.

Al utilizarse un nivel de referencia determinado (1 mW) la medida en dBm constituye una verdadera medición de la potencia y no una simple relación de potencias como en el caso de la medida en decibelios. Así, una lectura de 20 dBm significa que la potencia medida es 100 veces mayor que 1 mW y por tanto igual a 100 mW.

9 Anexo B - Metodología de trabajo

En este apartado se describirá la metodología de trabajo que se ha seguido durante todo el proyecto.

9.1 Criterios generales

El proyecto se ha realizado siguiendo la metodología general que aplica el siguiente esquema:

- Planificación.
- Ejecución o Implantación.
- Certificación.

De estas tres etapas, se realiza un especial énfasis en la planificación del proyecto, que es la que nos permite disponer de una guía de actuación consensuada y que coordina cada una de las actividades que serán realizadas simultáneamente.

Planificación:

La etapa de Planificación deberá fijar las actividades a realizar para alcanzar los objetivos previstos, los cuales permitirán una óptima ejecución y control del proyecto.

Tendrá que definirse por tanto:

- Su alcance
- Su secuencia
- Los procedimientos para verificar su correcta ejecución.

Ejecución:

En la etapa de Ejecución o Implantación, se realizan todas las actividades que han sido desarrolladas en la Planificación.

Certificación:

En la etapa de Certificación se verifica la instalación y el correcto funcionamiento de los equipos, realizando las pruebas necesarias para la comprobación de los diferentes elementos, así como la integración y funcionamiento conjunto de los diversos subsistemas que componen la solución completa.

En el siguiente gráfico se observa la secuencia de las distintas etapas del desarrollo del proyecto así como los mecanismos de realimentación (reacción):

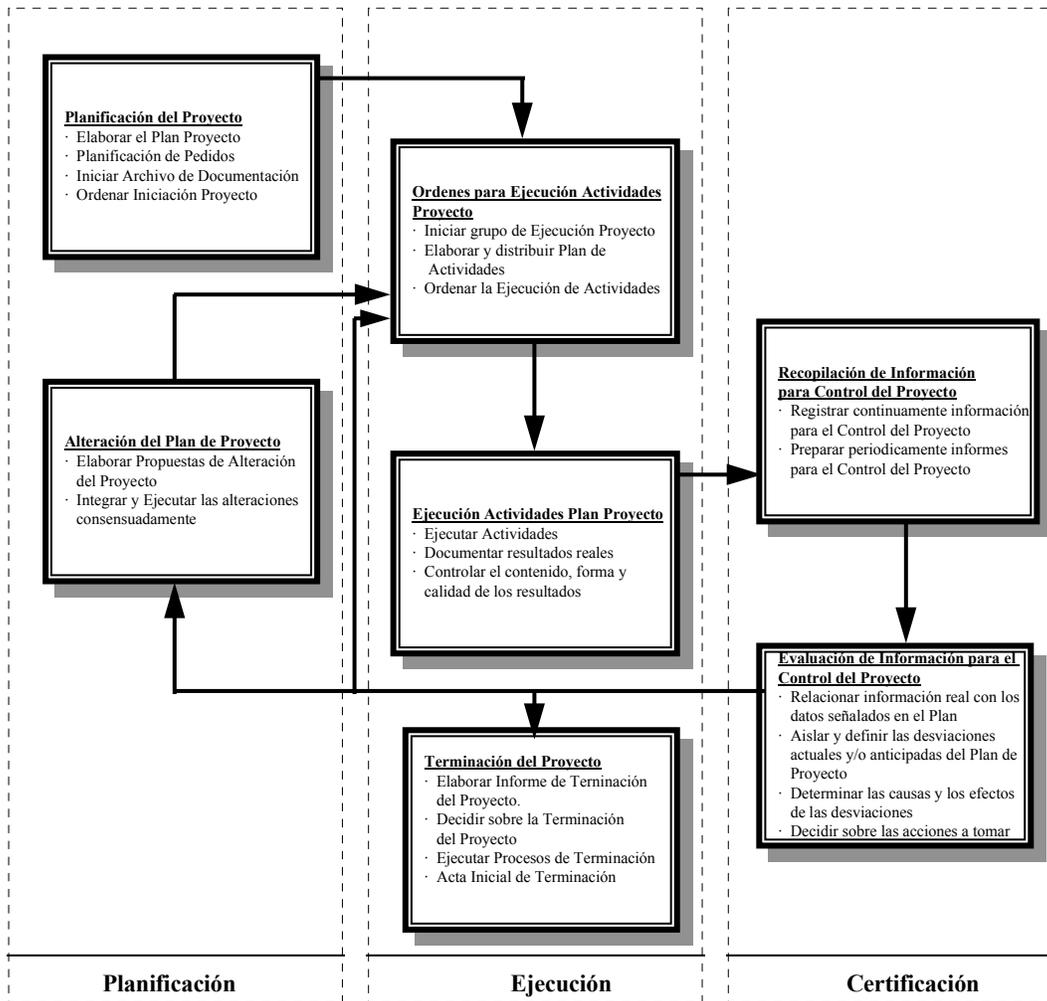


Figura 77 Esquema de la metodología de trabajo

9.2 Planificación

Para proyectos como el que nos ocupa, tanto la Planificación como la Coordinación de tareas son elementos de gran importancia.

Utilizando como base el proyecto de Ingeniería realizado en la fase inicial y en coordinación con los responsables por parte del cliente, se confeccionarán una serie de planes individuales que permitan facilitar el desarrollo del proyecto de ejecución e implantación de la solución técnica propuesta.

En la etapa de Planificación se confeccionarán los siguientes Planes:

- Definición hardware
- Planificación de Pedidos
- Plan de Seguimiento y Control del Proyecto
- Plan de Ejecución, Configuración y Puesta a Punto

- Plan de Formación
- Plan de Documentación

9.2.1 Definición hardware

Los primeros pasos en el desarrollo del proyecto irán encaminados a la definición del hardware a implantar.

Junto con el cliente se cerrarán todos los detalles relativos al hardware a instalar en las estaciones y el software.

9.2.2 Planificación de pedidos

Con el fin de reducir los plazos de entrega que el presente proyecto contempla, se propone realizar una reunión de revisión del equipamiento necesario, contemplando el caso en el que el pedido no se ajuste con el equipamiento ofertado.

9.2.3 Plan de seguimiento y de control del proyecto

El Plan de Control de Proyecto especificará los mecanismos adecuados para supervisar el curso de las actividades durante la vida del proyecto.

Para ello en esta etapa de Planificación se establecerán los hitos de control, y se acordará la realización de reuniones periódicas de seguimiento con los representantes del cliente. En dichas reuniones se tomarán las decisiones orientadas a realizar alguna alteración sobre la Planificación ya realizada si procediera.

Todas las decisiones o acciones que en estas reuniones se planteen serán debidamente documentadas. En el anexo 2 se adjuntan los documentos utilizados para realizar un correcto control del proyecto.

9.2.4 Plan de ejecución

En el documento del Plan de Ejecución se definirán las siguientes actividades:

- **Replanteo:** como etapa anterior al inicio de las instalaciones se procederá a la realización de un replanteo in-situ del emplazamiento objeto de la instalación en el que se confirmarán y ajustarán los detalles de suministro y características de instalación.
- **Pre-instalación:** antes de efectuar el envío de todo el equipamiento y material, se procederá a un replanteo de las instalaciones.
- **Envío del Material:** una vez finalizado el replanteo se procederá al envío de material.

- **Instalación de los equipos:** esta tarea se solapará con la anterior en la medida de lo posible, asimismo se adelantarán todos los trabajos de pre-configuración de los equipos con el objeto de reducir el tiempo de puesta a punto del sistema.
- **Puesta a punto del sistema:** se procederá a la configuración del sistema según los parámetros que se determinen y se comprobará su correcto funcionamiento.

9.2.5 Plan de formación

El objeto de la formación incluida en la presente propuesta es el de dotar de los conocimientos necesarios al personal dependiente del cliente, y que quedará a cargo del sistema tras la puesta en marcha del mismo, para el adecuado uso y mantenimiento de las instalaciones y el software instalado como parte del proyecto.

9.2.6 Plan de documentación

Se entregará toda la documentación necesaria para tener una clara descripción del proyecto, aportando planos esquemas de distribución de cableados, etiquetado, etc.

De esta forma se incluirá la siguiente documentación:

- Planos de instalación detallando la localización de los equipos, trazado de cable interior, etc.
- Manuales técnicos de los componentes y accesorios suministrados.
- Procedimientos para la aceptación del equipamiento.

10 Anexo C – Informes para el seguimiento del proyecto

10.1 Dimensionamiento del sistema

| PPI: DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA | | dominion |
|---|----------------------------|-----------------|
| <i>código del proyecto:</i> | <i>título:</i> | |
| <i>interlocutor presente:</i> | <i>cliente:</i> | <i>tfn.</i> |
| <i>realizado por:</i> | <i>fecha de replanteo:</i> | |
| <i>emplazamiento:</i> | <i>dirección:</i> | |
| <i>contacto:</i> | <i>empresa:</i> | <i>tfn.</i> |
| Equipos instalados | Observaciones | |
| <i>Puntos sonoros</i> | <input type="checkbox"/> | |
| <i>Equipamiento del Centro de Control</i> | <input type="checkbox"/> | |
| <i>Sondas</i> | <input type="checkbox"/> | |
| <i>Etapas de potencia</i> | <input type="checkbox"/> | |
| CONFIGURACIÓN DE LA INSTALACIÓN | | |
| <i>equipos</i> | <i>observaciones</i> | |
| <i>Puntos sonoros</i> | | |
| <i>Equipamiento del Centro de Control</i> | | |
| <i>Sondas</i> | | |
| <i>Etapas de Potencia</i> | | |
| <i>otros elementos</i> | | |
| <i>Cableado</i> | | |
| <i>Potencia</i> | | |

10.5 Detección de averías

| PPI: DETECCIÓN DE AVERÍAS | | dominion |
|--|----------------------------|-----------------|
| <i>código del proyecto:</i> | <i>título:</i> | |
| <i>interlocutor presente:</i> | <i>cliente:</i> | <i>tfn.</i> |
| <i>realizado por:</i> | <i>fecha de replanteo:</i> | |
| <i>emplazamiento:</i> | <i>dirección:</i> | |
| <i>contacto:</i> | <i>empresa:</i> | <i>tfn.</i> |
| AVERÍAS | | |
| Puntos sonoros | | |
| <i>Observaciones: Indicar zona con punto sonoro averiado</i> | | |
| | | |
| Puesto operador | | |
| <i>Observaciones</i> | | |
| | | |
| Equipos del Centro de Control (procesador, amplificador...) | | |
| <i>Observaciones</i> | | |
| | | |

11 Anexo D – Presupuesto

| Pos. | Cant. | Descripción | Pr. Unit. € | Total € |
|---|-------|--|-------------|--------------------|
| SUMINISTRO E INSTALACION CAP.I.- SALA DE CONTROL | | | | |
| 1 | 1 | Ud. Suministro e instalación de Procesador Matriz de audio digital SOUNDWEB LONDON Z-BLUE-16. | 6.342,39 € | 6.342,39 € |
| 2 | 1 | Ud. Suministro e instalación de PC con TFT, altavoces, teclado y ratón para control y gestión de columnas acústicas. Incluye sistema operativo y elementos necesarios para su funcionamiento. | 1.111,12 € | 1.111,12 € |
| 3 | 1 | Ud. Suministro e instalación de Rack auxiliar de megafonía para pruebas antes de instalación definitiva de equipamiento. Incluye panel de protección eléctrica, bandejas, paneles ciegos, tornillería, ventilación, pequeño material y accesorios necesarios. | 972,23 € | 972,23 € |
| 4 | 1 | Ud. Suministro e instalación de reproductor de CDs de la marca Denon modelo dn-c640. | 1.527,78 € | 1.527,78 € |
| 5 | 1 | Ud. Suministro e instalación de micrófono inalámbrico modelo SKM 165 G2 de la marca Sennheiser | 833,34 € | 833,34 € |
| TOTAL CAP.I.- | | | | 8.425,74 € |
| CAP.II.- SISTEMA ELECTROACÚSTICO | | | | |
| 4 | 4 | Ud. Suministro e instalación de Sonda de audio modelo c562CM de la marca AKG | 416,67 € | 1.666,68 € |
| 5 | 2 | Ud. Suministro e instalación de Columna acústica de 32 canales digitales controlables con procesador / amplificador DSP de Renkus - Heinz, modelo IC32/16. Treinta y dos altavoces de 4". Rango de respuesta 120 Hz to 18 kHz. Cobertura en horizontal 150 grados y variable de 5 a 15 grados en vertical. Sensibilidad 100 dB Peak SPL a 30 m. Peso: 54.4 Kg Dimensiones: 377 cm x 15.3 cm x 15.3 cm. | 24.390,25 € | 48.780,50 € |
| TOTAL CAP.II.- | | | | 50.447,18 € |
| CAP.III.- INSTALACIÓN | | | | |
| 6 | 2 | Ud. Soporte metálico para columna acústica Renkus-Heinz. | 701,22 € | 1.402,44 € |
| 7 | 2 | Ud. Suministro e instalación de Punto de altavoz para columna acústica. Incluye parte proporcional de cableado, canalizaciones, soportes y pequeño material. | 682,64 € | 1.365,28 € |
| 8 | 1 | Ud. Pruebas, ajustes y puesta a punto del sistema. | 10.388,89 € | 10.388,89 € |
| 9 | 1 | Ud. Gestión de proyecto. Documentación As-Built y cursos de formación. | 1.386,67 € | 1.386,67 € |
| TOTAL CAP.III.- | | | | 14.543,28 € |
| TOTAL SUMINISTRO E INSTALACION | | | | 73.416,20 € |

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Alejandro Escolar Pabón
Ingeniero Superior de Telecomunicación

12 Anexo E – Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de sonorización de estaciones subterráneas basada en tecnología de megafonía directiva. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en

el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.