

SISTEMAS DE ALARMA POR VOZ EN TÚNELES: EL GRAN RETO DE LA INTELIGIBILIDAD

Juan Manuel Díaz¹, Pablo Vaquera², María Cristina Quintero³

¹ Director de Proyectos (CPMO) en LDA Audiotech S.L. (Máster en Ingeniería Acústica)
{jmdiaz@lda-audiotech.com}

² Responsable del área de Consultoría en LDA Audiotech S.L.
{pvaquera@lda-audiotech.com}

³ Máster en Ingeniería Acústica por la Universidad de Málaga
{mcristinaqp@gmail.com}

Resumen

La puesta en funcionamiento de los túneles de carretera exige garantizar un nivel suficiente de seguridad para proteger a los usuarios en caso de que se produzca alguna situación crítica que pueda poner en peligro la vida humana. El manual de explotación del túnel refleja de forma detallada todas las instalaciones que permiten una explotación en adecuadas condiciones de seguridad y eficiencia, incluyendo la megafonía como sistema de alarma por voz, para la correcta comunicación con los usuarios hacia las vías de evacuación. Las condiciones acústicas de estos entornos son sumamente complejas debido, principalmente, al enorme nivel de reverberación y las altas reflexiones laterales provocadas por la geometría propia del recinto, así como al enmascaramiento de señal provocado por el alto nivel de presión sonora de los sistemas de ventilación. En este artículo se pretende estudiar los requerimientos de diseño de los sistemas de alarma por voz en túneles con el objetivo de optimizar la inteligibilidad resultante, analizando la afección de factores clave como la alineación temporal de la señal, motores de compresión y bocinas, así como la orientación y ubicación de los puntos sonoros.

Palabras clave: inteligibilidad, túneles, evacuación, seguridad, alarma.

Abstract

The operation of road tunnels requires ensuring a sufficient level of safety to protect users in the event of a critical situation that may endanger human life. The tunnel operation manual provides a detailed account of all installations that ensure operation under adequate conditions of safety and efficiency. This includes the public address system as a voice alarm system for proper communication with users towards evacuation routes. The acoustic conditions in these environments are extremely complex due to the high level of reverberation and significant lateral reflections caused by the geometry of the space, as well as the signal masking caused by the high sound pressure level of the ventilation systems. This article aims to study the design requirements of voice alarm systems in tunnels to optimize the resulting intelligibility, analyzing the impact of key factors such as signal temporal alignment, compression drivers and horns, as well as the orientation and location of sound points.

Keywords: intelligibility, tunnels, evacuation, safety, alarm.

PACS n.º. 43.72.Kb, 43.72.-p, 43.72.Dv, 43.71.-k, 43.71.Gv.

1 Introducción

Los sistemas de evacuación por voz son de obligado cumplimiento para recintos de pública concurrencia, y especialmente útiles para aquellos en los que se precisa de una comunicación directa con los ocupantes de una determinada área o recinto en el que se está produciendo la situación de emergencia. En entornos complejos, se hace aún mayor hincapié en la necesidad de controlar la eficacia de estos sistemas. Este es el caso de los túneles de tráfico rodado en los que la geometría propia del entorno, los materiales habitualmente poco absorbentes y un nivel de ruido excesivo producido tanto por los sistemas de ventilación como por el propio tráfico rodado, dificultan enormemente el diseño de un sistema de evacuación y alarma por voz eficiente.

De forma habitual, se toman en cuenta los siguientes parámetros para medir la eficiencia de estos sistemas: el nivel de distorsión de la señal de salida (de la cadena de sonido al completo), el nivel de presión sonora y la inteligibilidad de la palabra. En el estudio de este último punto nos centraremos en los siguientes apartados.

2 Criterios normativos

Para homogenizar los criterios mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras, el Parlamento Europeo estableció la Directiva 54/2004 [1]. Esta directiva establece en su serie de recomendaciones el uso de altavoces dentro de los túneles de longitud superior a 3.000 metros, dotados de un centro de control y con un volumen de tráfico superior a 2.000 vehículos por carril, como parte de los equipos para detener los vehículos en caso de emergencia, sin establecer un criterio técnico específico. También indica que los refugios y otras instalaciones en que los usuarios del túnel deban esperar antes de poder llegar al exterior estarán equipados con altavoces para informar a los usuarios.

En España, la normativa que traspone estos requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado [2] establece como requisito mínimo un sistema de megafonía en aquellos túneles con una distancia mayor a 200 metros, y en entorno urbano, en cualquier caso, sin establecer ningún criterio específico sobre dicha megafonía como sistema de alarma por voz.

Si bien no existe una normalización específica para el diseño de sistema de alarma por voz en túneles de tráfico rodado, el estándar BS EN 60268-16:2011 [3] proporciona un marco para la evaluación de la inteligibilidad del habla en sistemas de sonido, utilizando el Índice de Transmisión del Habla (STI, del inglés Speech Transmission Index). Aunque la norma no está específicamente dirigida a túneles, los principios y métodos que establece son altamente aplicables a estos entornos debido a los desafíos acústicos que presentan.

2.1 Sistemas de megafonía y alarma por voz

Los sistemas de alarma por voz son esenciales para proporcionar información y guiar a las personas durante situaciones de emergencia en diversos entornos, incluidos los túneles. Es decir, no basta con establecer únicamente los mismos criterios en la evaluación técnica de la inteligibilidad del habla a través del STI que para cualquier sistema de sonido, sino que se debe orientar el diseño específico hacia los sistemas de sonido de emergencia, cubriendo aspectos adicionales como la redundancia y la fiabilidad, y proporcionando directrices para el mantenimiento y las pruebas regulares [4].

En concreto, para la evaluación de los sistemas de megafonía y alarma por voz o PA/VA (del inglés, Public Address/Voice Alarm) se establece el ensayo STIPA (Speech Transmission Index for Public Address) como el más apropiado, el cual emplea una señal de prueba que imita las fluctuaciones de intensidad típicas del habla, cuantificando la pérdida de modulación de la voz [5].

3 Requisitos del sistema de alarma por voz

El diseño de los sistemas PA/VA en túneles presenta desafíos significativos debido a las condiciones acústicas y de contorno únicas de estos entornos. Asegurar la inteligibilidad del habla y la efectividad de los mensajes transmitidos en una determinada ADA (Área Acústicamente Diferenciable) [7] requiere un enfoque detallado en varios aspectos críticos del sistema y un diseño meticuloso para mitigar los dos factores de afección principales: la acústica del túnel y el ruido ambiental.

3.1 Objetivos de inteligibilidad

El primer paso en el diseño es establecer el valor objetivo de la inteligibilidad. Utilizar el mismo umbral que el resto de los sistemas de megafonía, en los que se tiende a establecer el criterio de conseguir un 0,5 mínimo de STI, puede no ser realista. Se recomienda permitir un mínimo absoluto de 0,46 para estos entornos complejos [7], pudiendo reducir hasta 0,42 para aquellos ciertamente muy reverberantes [3]. Dada la arquitectura propia de un túnel, los cálculos estadísticos basados en el volumen y el tiempo de reverberación (RT, del inglés Reverberation Time) no son válidos. Si bien este parámetro es importante para el cálculo del STI, no es un factor tan dominante como en otros entornos, dado que las primeras reflexiones afectan significativamente el rendimiento del sistema en túneles por lo que el cálculo debe predecirse utilizando software de modelado electroacústico con el enfoque de trazado de rayos.

3.2 Objetivos de presión sonora

El siguiente requisito esencial en el diseño del sistema es superar en cada ADA el nivel de presión sonora sobre el ruido de fondo, generado principalmente por el tráfico y los sistemas de ventilación. Los motores de ventilación pueden alcanzar niveles de ruido de hasta 100 dBA, mientras que el tráfico a alta velocidad puede generar niveles de ruido cercanos a 95 dBA [8].

Para evitar el enmascaramiento de señal, los sistemas de alarma por voz deben superar este ruido de fondo en 5 [3] y 10 dB [7] por lo que las exigencias en cuanto a niveles de presión sonora son muy altas. Esto implica que, en ocasiones, el sistema PA/VA debería ser capaz de suministrar un nivel de presión sonora mayor del límite objetivo de 120 dBA [7] para que en el punto más alejado del altavoz las pérdidas por distancia se ajusten al nivel por encima del ruido de fondo.

4 Criterios de diseño

Una vez establecidos ambos objetivos para el nivel de presión sonora y la inteligibilidad de la palabra, el resultado esperado estará limitado por el propio diseño del recinto, sus reflexiones tempranas y el nivel de reverberación existente. Se indican a continuación los principales criterios de diseño para el sistema óptimo de alarma por voz:

4.1 Transductores electroacústicos

La elección de los altavoces es fundamental para conseguir los mejores resultados, siendo la solución más eficiente aquellos altavoces directivos con un rango estrecho en frecuencia, centradas en la voz, es decir, altavoz tipo bocina (Figura 1), que tienen la capacidad de proyectar sonido a largas distancias con alta directividad.

Las ondas sonoras emitidas por cada altavoz interfieren entre sí de forma constructiva o destructiva, produciendo variaciones en el nivel y calidad del sonido a lo largo del túnel. Además, al estar separados los altavoces por distancias significativas, los retrasos en el tiempo se reflejan en la existencia de ecos,

haciendo que los mensajes de emergencia sean difíciles de entender. Las líneas de retardo se muestran como la principal solución para solventar este problema, lo cual requiere un diseño cuidadoso para sincronizar correctamente el sonido emitido por cada altavoz.



Figura 1 – Altavoz tipo bocina exponencial convencional.

El inconveniente de este tipo de altavoces es que sus primeras reflexiones en el paramento más cercano provocan un efecto espejo [8] que induce ecos y reverberaciones que interfieren con la claridad del mensaje, según se muestra en la Figura 2.

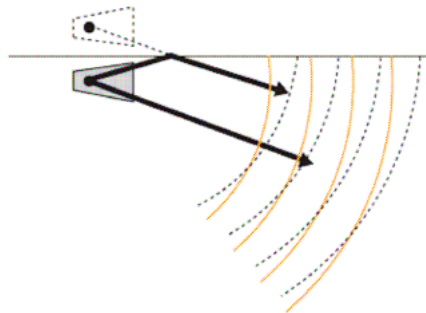


Figura 2 – Efecto espejo en superficie reflectante.

Para solventar este problema, los fabricantes han desarrollado otro tipo de bocinas de altas prestaciones (Figura 3), en el que el frente de ondas de salida es controlado mediante el diseño específico de la bocina para focalizar y dirigir el haz estrecho en un ángulo concreto, minimizando la dispersión sonora y mejorando la claridad e inteligibilidad.



Figura 3– Modelos de bocinas de haz dirigido de altas prestaciones.

4.2 Distribución y orientación de puntos sonoros

La distancia de separación entre puntos sonoros debe ser adecuada para garantizar un suficiente nivel de presión sonora. Límites habituales de separación de las bocinas son a 25 metros, para bocinas exponenciales convencionales, y 50 metros, para las de haz dirigido. Esta longitud depende del valor de presión sonora resultante tras la atenuación por distancia en los puntos de intersección, debiendo estar siempre por encima del nivel esperado respecto al ruido de fondo.

En cuanto a la orientación de las bocinas, nos encontramos con una controversia:

- Para una óptima transmisión del mensaje se recomienda en sentido contrario al tráfico. [8]
- Para una óptima percepción auditiva del mensaje se recomienda sentido contrario a las vías de evacuación [13].

Este último valora no sólo el medio físico por el que circula la onda acústica sino además el comportamiento de nuestro cerebro, dado que los factores humanos también influyen en los procedimientos de evacuación. Estudios al respecto han indicado que las personas tienden a evacuar un recinto por la misma ruta que utilizaron cuando entraron. La aplicación de tecnología de sonido direccional como medio para ayudar a las personas a localizar una salida de emergencia, identificando la fuente del sonido, es crucial para una evacuación satisfactoria [13].

Las bocinas deben colocarse a lo largo de la línea central del túnel y orientarse en la dirección opuesta al flujo del tráfico, con una ligera angulación hacia abajo, lo que consigue que el sonido se propague hacia los vehículos y peatones que se desplazan en la dirección opuesta a medida que se acercan a la fuente sonora, produciéndose una mejora de la inteligibilidad [8].

4.3 Alineación temporal versus el tiempo de evacuación

Las líneas de retardos usadas para ajustar el tiempo de propagación entre bocinas adyacentes toma especial importancia en túneles largos donde el sonido de una bocina podría llegar a una audiencia junto con el sonido retrasado de la adyacente, causando eco. Cada bocina debe sincronizarse con las demás para asegurar que el sonido llegue a los oyentes de manera coherente. Esto implica ajustar el retardo en función de las distancias entre bocinas.

El inconveniente es que, para grandes longitudes, centrar el sistema en el punto de salida/entrada del túnel es contraproducente. Por ejemplo, para un túnel de 10 kilómetros de longitud, tendríamos un retardo de señal de unos 30 segundos, lo que sería totalmente inaceptable en caso de necesidad de evacuación. Esta es la principal problemática de los sistemas de evacuación en túneles.

Las catástrofes acontecidas en túneles han evidenciado de manera clara la relevancia de una evacuación eficaz y rápida. El proceso de evacuación abarca todas las etapas desde el momento en que comienza un incendio hasta que las personas atrapadas alcanzan un área segura. Este tiempo se puede dividir en tres fases [9], cada una con una duración específica:

- **Tiempo de conciencia:** tiempo necesario para que un individuo se dé cuenta del peligro.
- **Tiempo de respuesta:** tiempo que tarda un individuo en darse cuenta de que hay un peligro potencial y actuar, típicamente para tomar la decisión de evacuación.
- **Tiempo de movimiento:** determinado por la condición física y de salud del individuo, la configuración de las salidas de escape del túnel, la distancia a la salida segura más cercana y factores adicionales como el número de personas en el túnel dirigiéndose hacia la misma salida

Los sistemas de alarma por voz tienen mucha importancia e influencia directa en los tiempos de conciencia y respuesta. De ahí la importancia de desarrollar e implantar un sistema efectivo y coordinado, para minimizar estos tiempos lo máximo posible y garantizar la seguridad y supervivencia en casos de emergencia; cuanto antes se detecte y se avise de la incidencia, menor serán estos tiempos. Uno de los métodos propuestos para la evaluación del comportamiento humano en esos primeros instantes en la aparición de la emergencia hasta el inicio de la evacuación, se basa en tres fases principales: sistema de identificación de incendios, sistema de control y sistema de advertencia [10]. Cada uno de estos componentes tecnológicos se representa por su tiempo de respuesta (Figura 4). El tiempo total t_{TS} para informar a las personas de la emergencia se define como,

$$t_{TS} = t_{ID} + t_{IF} + t_{PN}, \quad (1)$$

donde t_{ID} representa el tiempo de identificación de incendios; t_{IF} denota el tiempo necesario para difundir la información de advertencia a la mayoría de las personas atrapadas en el túnel; y t_{PN} es el tiempo de demora que depende de las reglas operativas del sistema de control particular [10].

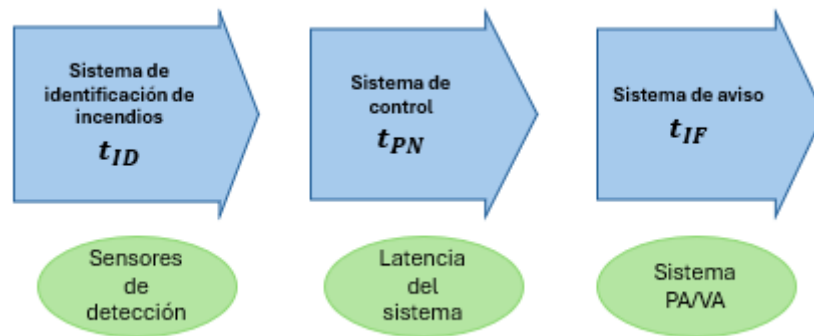


Figura 4 – Componentes de la identificación de la emergencia en el sistema de aviso

En el caso que nos ocupa, el objetivo es minimizar t_{IF} , dado que los otros tiempos depende de otros sistemas. El t_{IF} depende de la activación de la señal, que estará formado por la propia latencia electrónica del sistema y el retardo provocado por el alineamiento temporal de la señal.

Por tanto, se debe llegar a una situación de compromiso entre el retardo a aplicar en la señal por la longitud del túnel y la propia latencia del sistema de alarma por voz.

4.3.1 Retardo máximo permitido en la evacuación certificada.

Para evitar tiempos de evacuación excesivos que pongan en riesgo la integridad de los ocupantes de una determinada ADA, la normativa y recomendaciones europeas fijan un máximo de 3 segundos como tiempo total para iniciar la evacuación desde la detección de la emergencia (t_{TS}):

- Según la EN 54-16, el sistema debe ser capaz de recibir y procesar las señales de alarma, y causar las salidas de alarma por voz apropiadas en 3 segundos o en el vencimiento de cualquier periodo de retraso [11].
- En el caso de la UNE EN60849, el sistema debe ser capaz de emitir una primera señal de alerta antes de pasados 3 segundos desde que es puesto en modo de emergencia por el operador o de forma automática al recibir una señal de fuego o de cualquier otro sistema de detección. En este último caso, el periodo de 3 s incluye el tiempo de reacción del sistema de detección desde el momento en que la emergencia es detectada hasta que se produce la señal de alarma [12].
- Para la norma UNE 23007-32, el tiempo transcurrido desde que se recibe una señal de emergencia y el inicio de la emisión del mensaje de emergencia o, en su caso, el inicio de cualquier retardo programado no debe exceder de 3 segundos [7].

Por tanto, el inicio de emisión de la señal de evacuación en cada ADA deberá producirse dentro de los 3 segundos en sistemas certificados, incluyendo el retardo (alineación temporal) de la señal.

4.3.2 Propuesta de ventana de retardo temporal.

Dado que la alineación temporal es un punto clave para mejorar la inteligibilidad de la señal, es necesario buscar un modelo de aplicación que consiga disminuir el efecto de las cancelaciones producidas por la no coherencia de la señal. Algunos fabricantes [16] proponen la agrupación de las bocinas en conjuntos de retardo igual o inferior a 3 segundos, en función de la longitud del túnel. Esto implica no establecer el punto cero simplemente desde la entrada o la salida del túnel sino segmentar el tramo en varias zonas o grupos de altavoces, sintonizando el grupo para emitir la señal de voz con un retraso específico y coordinado, siempre inferior a 3 segundos en total. Este enfoque sigue permitiendo una transmisión de sonido coherente y clara en entornos reverberantes; si bien habrá intervalos con una peor inteligibilidad (cruce entre grupos), permite lanzar el mensaje en un tiempo coherente.

A modo de ejemplo, se supone un túnel de 5 kilómetros de longitud, y se divide en secciones de 1.000 metros cada una. A cada bocina del grupo de altavoces, se irá aplicando el tiempo de retardo (t_r) en función de la longitud hacia el punto inicial del grupo, según la siguiente fórmula:

$$t_r = \frac{\text{longitud sección}}{v_{\text{prop sonido}}}, \quad (2)$$

Teniendo en cuenta la distancia de 50 metros de separación recomendada entre bocinas [8], se obtendrá un t_r de 150 milisegundos entre la primera bocina (punto cero) y la siguiente, duplicando el valor conforme se duplica la distancia, hasta llegar al máximo de los 3 segundos indicados. Es decir, al grupo de 20 bocinas. Al siguiente grupo de altavoces, en dirección opuesta al primero, se le volverá a aplicar un tiempo de retardo en función de la bocina 21, como nuevo punto cero o máximo, aplicando de nuevo esos 150 milisegundos a cada bocina, en dirección opuesta al anterior (Figura 5).

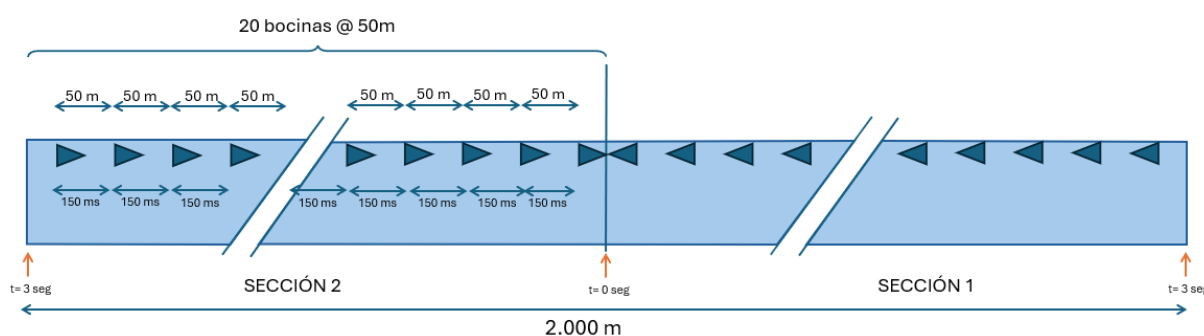


Figura 5 – Ejemplo de distribución de bocinas en dos secciones adyacentes.

Este diseño tiene la ventaja de poder reducir el nivel de retardo a aplicar en la señal (para evitar grandes tiempos de espera en posibles puntos críticos de la evacuación), pero tiene el inconveniente de generar posibles cancelaciones en los puntos de cruce de los grupos de bocinas, efecto adverso que se analizará en un caso real de estudio.

5 Caso de estudio

5.1 Descripción del modelo

Para verificar el análisis realizado, se llevará a cabo la simulación acústica con el software EASE[®] AURA basado en la teoría de rayos. Se utilizará un tramo de túnel real, modelado en 500 metros de longitud, con una distancia de 14,20 metros entre hastiales y una altura de 9,20 metros. El área de audiencia se determinará entre 250 y 500 metros, para optimizar el tiempo de computación. En la Figura 6 se representa el modelo en planta de tramo en estudio.

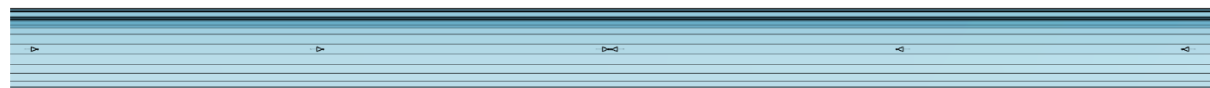


Figura 6 – Vista detalle de planta del modelo en estudio.

Los altavoces utilizados serán bocinas de haz dirigido de altas prestaciones modelo TH-100-EN54 de la marca IC AUDIO, espaciadas 50 metros y ubicadas a 9,10 metros de altura sobre el techo del túnel.

Los materiales utilizados fueron hormigón rugoso para los hastiales y el techo, y asfalto común para el suelo, con unos coeficientes de absorción medios de 0,05 y 0,035, respectivamente. En el modelo, a las superficies de entrada y salida del túnel se les atribuye absorción total para el modelado del aire. Con estos materiales y el modelo presentado, resulta un tiempo de reverberación de 4,31 segundos en la banda de 1 kHz, con grandes componentes en bajas frecuencias, como era de esperar, según Figura 7.

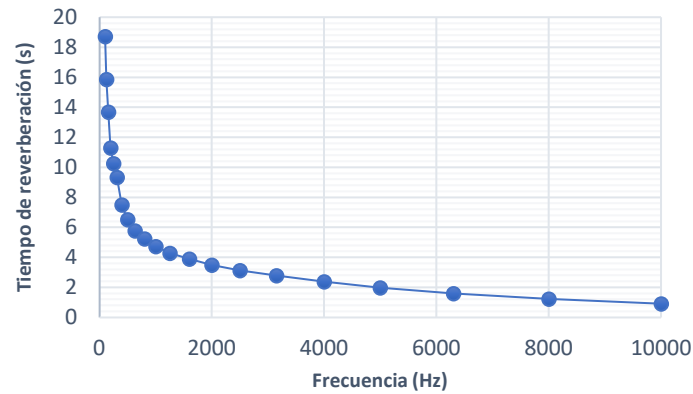


Figura 7 – Tiempo de reverberación del modelo para cada banda de frecuencia.

5.2 Resultados de la simulación

Con el modelo ya optimizado, se proceden a realizar las simulaciones del trazado de rayos y diferentes opciones de diseño.

5.2.1 Sin retardo de señal

En primer lugar, se realiza una orientación básica de los puntos sonoros, sin aplicar ninguna alineación temporal a la señal.

En este caso, es posible observar claramente el efecto peine producido, tal como se muestra en la vista isométrica de la Figura 8 en la que se representa el nivel de presión sonora (SPL, del inglés Sound Pressure Level) directo en la banda de 1KHz.

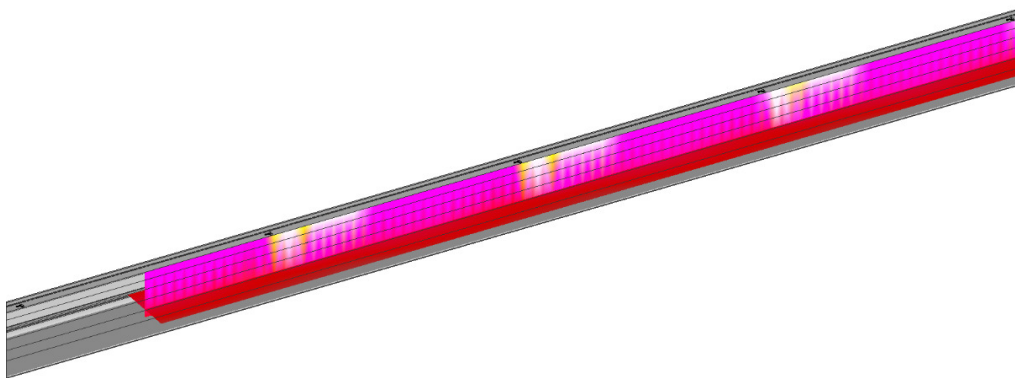


Figura 8 – Simulación acústica de la señal sin alineación temporal de altavoces.

Este efecto influye muy negativamente al STI, según la Figura 9, por tanto se hace necesario aplicar un retardo a la señal para poder optimizar el resultado de la inteligibilidad.

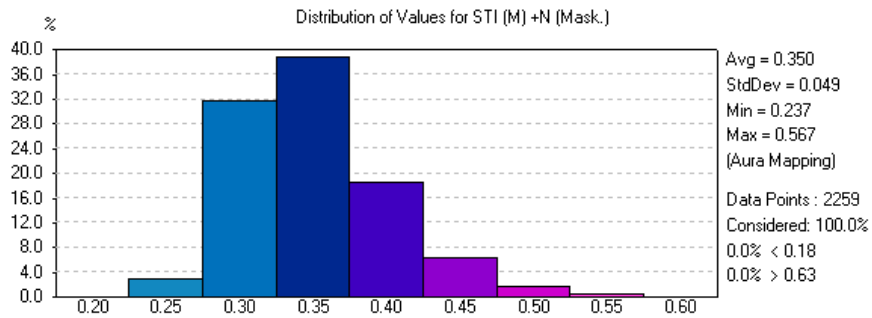


Figura 9 – Distribución de los valores de SPL directo sin retardo de señal aplicado.

5.2.2 Con retardo global

Se proceder a realizar el mismo diseño anterior, pero aplicando una alineación temporal a la señal, estableciendo el punto $t = 0$ en un extremo del túnel, con un retardo de 145,77 ms. En este caso, el resultado del SPL directo arroja una distribución más coherente de la señal, según la Figura 10.

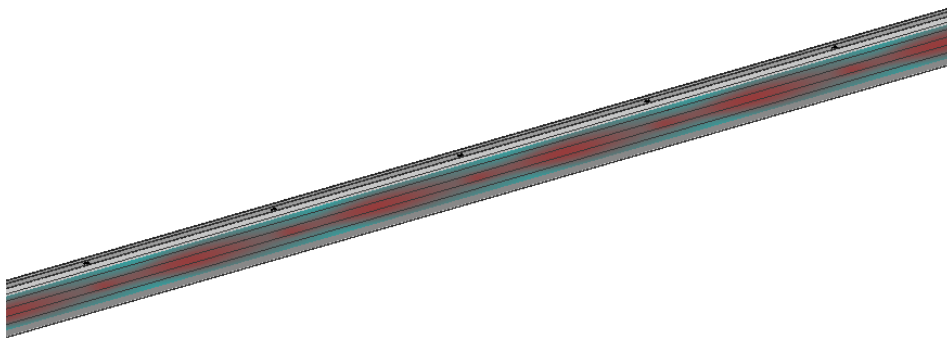


Figura 10 – Distribución de los valores de SPL directo en la banda de 1 kHz para el modelo con retardo.

Analizando los resultados de inteligibilidad, se obtiene un nivel de STI medio de 0,46 para el modelo ajustado con retardo de señal coherente en todo el tramo, según la Figura 11.

Como se verá en adelante, este valor es el máximo obtenido con las mejores prestaciones de diseño posibles, pero sin tener en cuenta el tiempo de retardo total ante la evacuación del túnel.

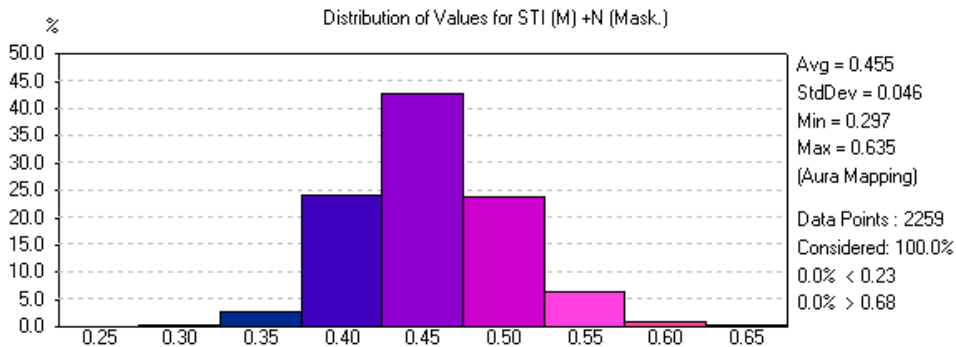


Figura 11 – Distribución de los valores de STI para el modelo con retardo.

5.2.3 Ventana de retardo

Se procede a continuación a analizar las consecuencias de aplicar las ventanas de retardo en los grupos de bocinas, cuyo objetivo principal es aminorar los tiempos de evacuación en túneles de grandes longitudes. Como se ha indicado anteriormente, el punto conflictivo de este diseño será el cruce entre los grupos de bocinas debido al cambio de dirección entre las mismas.

En la Figura 12 se muestra la distribución del nivel de presión sonora directo (SPL,d) para la banda de 1 kHz, donde se puede ver el área de conflicto indicada:

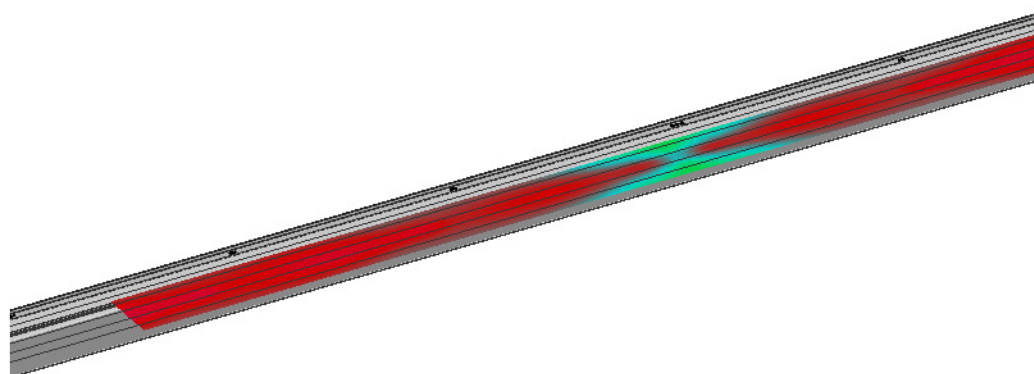


Figura 12 – Distribución de SPL directo para la banda de 1 kHz con ventana de retardo.

La distribución del nivel de presión sonora total (SPL,t) en la banda de 1 kHz reporta valores coherentes de señal, con una desviación de ± 3 dB respecto al valor medio.

Respecto a la distribución de los valores de inteligibilidad simulados, se observa como el STI se ve negativamente afectado en la zona de intersección, como se había adelantado, según la Figura 13.

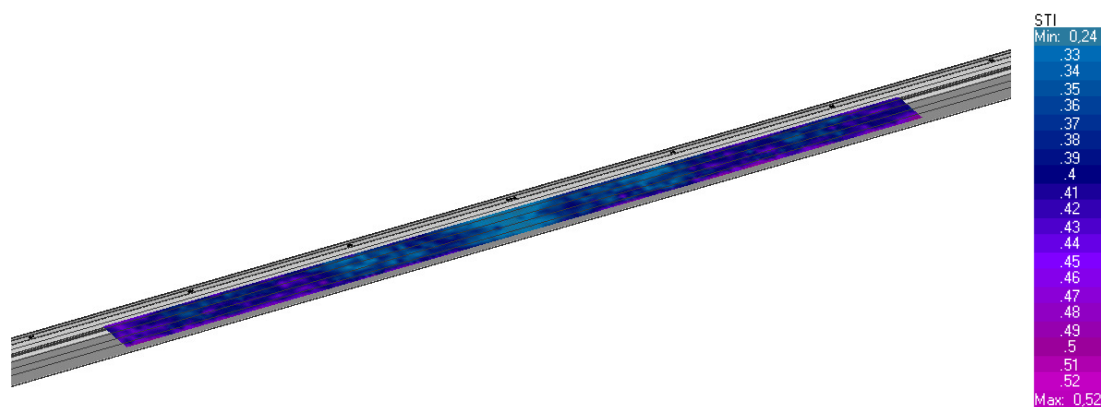


Figura 13 – Detalle de la distribución de los valores de STI en el punto de transición en ventana de retardo.

Estos resultados mejoran los determinados por el modelo sin retardo, pero son ligeramente inferiores a los obtenidos en el modelo con retardo completo.

No obstante, para la distribución en dos tramos completos con ventanas de 1.000 metros un túnel de longitud mayor, para evitar los 3 segundos máximos de retardo, representará un 10% de valores desfavorable, lo que hará disminuir la media del STI, como se ha evidenciado en la simulación anterior, pero se conseguirá mantener en valores en torno a 0,42 -0,45 según los materiales empleados.

6 Conclusiones

El diseño y la implantación de sistemas de alarma por voz en túneles de tráfico representan un desafío técnico significativo debido a las complejas condiciones acústicas y ambientales presentes en estos entornos. La acústica desfavorable dentro de los túneles, caracterizada por superficies reflectantes y niveles de ruido elevados generados por el tráfico y los sistemas de ventilación, compromete la inteligibilidad del habla y la efectividad de los mensajes transmitidos. Las exigencias en niveles de presión sonora y de inteligibilidad deben ser realistas con la arquitectura del propio túnel.

Para asegurar una comunicación efectiva durante emergencias, es esencial que los sistemas de alarma por voz empleen altavoces con adecuada directividad, linealidad y respuesta en frecuencia. La corrección del retardo de propagación mediante el uso de líneas de retardo ayuda a evitar la percepción de ecos y garantizar una transmisión clara del mensaje a lo largo del túnel, aunque, según se ha visto, estos retardos pueden entorpecer el tiempo efectivo de evacuación por lo que debe existir un compromiso entre el retardo aplicado y el tiempo de evacuación deseado.

No existe una norma común que establezca claramente los requisitos técnicos que deben cumplir los sistemas de alarma por voz en túneles. En cualquier caso, se debe evitar el uso de recomendaciones de entornos más simples, el criterio de diseño debería ser específico y estandarizado.

A pesar de los avances normativos y tecnológicos, persisten desafíos prácticos como el mantenimiento de condiciones acústicas óptimas y la gestión eficiente de sistemas distribuidos en secciones para abarcar túneles de gran longitud.

El desarrollo continuo en técnicas de diseño acústico y avances en tecnología de megafonía son fundamentales para mejorar la robustez y fiabilidad de los sistemas de alarma por voz en túneles, asegurando así una respuesta efectiva y segura ante situaciones de emergencia para los usuarios y operadores involucrados. Además, el diseño acústico arquitectónico de soluciones fonoabsorbentes es fundamental para poder reducir el número de reflexiones y mejorar con ello el nivel de inteligibilidad.

En cualquier caso, el objetivo debe ser conseguir llegar a una situación de compromiso para mantener un nivel de inteligibilidad aceptable y asegurar que el mensaje se emite dentro del tiempo máximo permitido.

Referencias

- [1] Parlamento Europeo y Consejo. (2004). DIRECTIVA 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.
- [2] Ministerio de Fomento. (2006). Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. Boletín Oficial del Estado, 126, 27 de mayo de 2006. Referencia: BOE-A-2006-9296.
- [3] CENELC. (2011). BS EN 60268-16:2011. Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Bruselas, agosto 2011.
- [4] Asociación Española de Normalización. (2017). UNE-EN 50849:2017. Sistemas de sonido para servicios de emergencia. Ratificada en abril de 2017.
- [5] Díaz Contreras, J. M., Vaquera Bermúdez, P. (2023). Criterios de inteligibilidad en los sistemas de alarma y evacuación por voz. Cuenca.
- [6] Barrera, J., Díaz, J. M. (2020). La inteligibilidad en los sistemas de evacuación por voz. Málaga. Recuperado de <https://lda-audiotech.com/category/articulos/blog-tecnico/>

- [7] Asociación Española de Normalización. (2020). UNE 23007-32. Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 32: Planificación, diseño, instalación, puesta en marcha, uso y mantenimiento de sistemas de alarma por voz. Madrid, septiembre 2020.
- [8] Start, E. (2011). Design of voice alarm systems for traffic tunnels: Optimisation of speech intelligibility. Duran Audio BV, Zaltbommel, The Netherlands.
- [9] Persson, M. (2002). Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of the Road Tunnel. Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Report 5096, Lund.
- [10] Přibyl, P., Přibyl, O. (2011). Effect of tunnel technological systems on evacuation. Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences, Na Florenci 25, Praha 1, 11000, Czech Republic.
- [11] Asociación Española de Normalización. (2010). UNE-EN 54-16:2010. Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 16: Control de la alarma por voz y equipos indicadores, apartado 7.1.1.
- [12] Asociación Española de Normalización. (2002). UNE-EN 60849. Sistemas electroacústicos para servicios de emergencia. Madrid, mayo 2002. (Derogada por UNE EN 50849:2017).
- [13] Vedul Tronstad T., D. Jenssen Gunnar, Moscoso C., Södersten C., Zaikonnikov E. (2021). Sound signals to improve evacuation in road tunnels. Fire Safety Journal 125. Norway.
- [14] J. van Wijngaarden, S., A. Verhave, J. (2005). Prediction of speech intelligibility for public address systems in traffic tunnels. The Netherlands.
- [15] Lau1, A., Rowe1 D. (2015). Comparative analysis of on-site STIPA measurements with EASE predicted STI results for a sound system in a railway station concourse. Acoustic 2015 Hunter Valley. Sydney, Australia
- [16] AXYS[®] Tunnel (2020). Public Address Solutions for tunnels: Intelligent Solutions for Delivering Speech Intelligibility. HARMAN[®].