



CRITERIOS DE INTELIGIBILIDAD EN LOS SISTEMAS DE ALARMA Y EVACUACIÓN POR VOZ

Juan Manuel Díaz Contreras^{1*}
Pablo Vaquera Bermúdez²

¹ Director de Proyectos en LDA AUDIOTECH, S.L., I. T. Telecomunicación (esp Sonido e Imagen).

² Responsable del área de Consultoría en LDA AUDIOTECH S.L.

RESUMEN

El índice de inteligibilidad (STI, del inglés Speech Transmission Index) en los sistemas de alarma y evacuación por voz, permite valorar el grado de percepción y entendimiento del mensaje, debiendo ser mayor o igual a 0,5 en el 95% del área en estudio, según la norma de aplicación actual UNE EN 60849. En esta comunicación se analiza cómo mejorar los niveles de STI a partir del tratamiento digital de la señal proveniente de la fuente sonora, adaptando las bandas de frecuencias que mejoran el rendimiento del algoritmo de medición, así como las referencias a la futura normativa de aplicación UNE EN 23007-32 sobre “Sistemas de detección y alarma de incendios - Parte 32: Planificación, diseño, instalación, puesta en marcha, uso y mantenimiento de sistemas de alarma por voz”, que ya ha sido publicada en el RSCIEI y que será incluida próximamente en el RIPCI, reemplazando a las actuales UNE EN 23007-14 y UNE EN 60849. Se revisarán también los límites físicos que establece la norma UNE-EN 60268-16 sobre “Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla” aplicados a diferentes entornos reverberantes para la implantación de sistemas de alarma y evacuación por voz.

ABSTRACT

The Speech Transmission Index (STI) in voice alarm and evacuation systems allows evaluating the degree of perception and understanding of the message, which should be greater than or equal to 0.5 in 95% of the area under study, according to the current UNE EN 60849 standard. This communication analyzes how to improve STI levels through digital processing of the signal from the sound source, adapting frequency bands that enhance the measurement algorithm's performance, as well as references to the upcoming UNE EN 23007-32 application standard on 'Fire detection and alarm systems - Part 32: Planning, design, installation, commissioning, use, and maintenance of voice

alarm systems,' which has already been published in the RSCIEI and will soon be included in the RIPCI, replacing the current UNE EN 23007-14 and UNE EN 60849. The physical limits established by the UNE-EN 60268-16 standard on 'Objective assessment of speech intelligibility by speech transmission index' applied to different reverberant environments for the implementation of voice alarm and evacuation systems will also be reviewed.

Palabras Clave— inteligibilidad, evacuación, megafonía.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de alarma y evacuación por voz (PAVA, del inglés Public Address and Voice Alarm) es un sistema de comunicación diseñado para proporcionar instrucciones claras y precisas en situaciones de emergencia, o cualquier otra situación en la que sea necesario comunicarse con un gran número de personas de manera rápida y efectiva.

Los criterios de diseño de los sistemas PAVA están sujetos a requisitos normativos, entre otros, la inteligibilidad o el porcentaje de palabras entendidas correctamente, del total de pronunciadas por un orador perfecto.

Para medir la inteligibilidad en un recinto para casos de evacuación, los métodos aceptados son el índice de transmisión del habla STI (Speech Transmission Index), y el índice de transmisión del habla en megafonía STIPA (Speech Transmission Index for Public Address) [1] que es una simplificación del anterior. En ambos casos se emplea una señal de prueba que inyecta en el sistema una señal modulada que imita el habla con sus típicas fluctuaciones de intensidad. Este fenómeno se puede analizar mediante la función de transferencia de modulación (MTF, del inglés Modulation Transfer Function) [2], que cuantifica la pérdida de modulación de la voz.

* **Autor de contacto:** juanmadiazcontreras@gmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

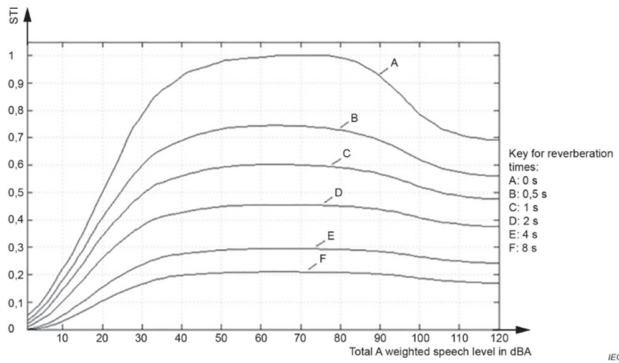


Figura 1. Relación entre STI y nivel del habla para diferentes RT.

La distorsión introducida por el ruido, el sistema de evacuación, los altavoces y la reverberación del recinto se traduce en cambios de la señal de prueba que quedan reflejados en la medición del índice STI, según Ec. 1:

$$STI = \sum_{i=1}^7 W_i (S/N_i + 15)/30 \quad (1)$$

Donde STI = índice de transmisión del habla

W_i = ponderación asociada a la banda de octava i

S/N_i = relación equivalente de habla-ruido para la banda de octava i

i = índice que identifica a las 7 bandas de octava entre 125 y 8000Hz

Métodos como el RASTI (del inglés, Rapid STI) [2] o el STITEL no se determinan adecuados para medir la inteligibilidad de un sistema de evacuación por voz [3].

2. LÍMITES OBJETIVOS DE LA INTELIGIBILIDAD

Los factores que determinan la inteligibilidad están relacionados de manera directa entre sí, de manera que el tiempo de reverberación (RT, del inglés Reverberation Time) del recinto condicionará el nivel de STI; una reverberación excesiva hará que el sonido dificulte la comprensión del habla [4]. Del mismo modo, un nivel excesivo de ruido de fondo también interfiere en la capacidad de entendimiento del mensaje; la mejora de la relación señal-ruido ayudará a mejorar la inteligibilidad [5]. Por tanto, en el diseño del sistema PAVA el nivel de presión sonora (SPL, del inglés Sound Pressure Level) deberá ser el adecuado para obtener el grado de inteligibilidad deseado según el tipo de recinto.

Esta relación física entre el tiempo de reverberación, nivel de presión sonora e inteligibilidad, se refleja en la Figura 1, y determina el condicionamiento mutuo entre dichos factores en el mensaje emitido.

En función del uso del recinto, se determinan unos valores objetivos de STI. Así, en la evacuación por voz (VA

systems) se recomienda un valor objetivo de 0,5, un valor mínimo de 0,46 para recintos complejos, y nunca inferior a 0,42, como se muestra en la Figura 2 [1].

Category	Nominal STI value	Type of message information	Examples of typical uses (for natural or reproduced voice)	Comment
A+	>0,76		Recording studios	Excellent intelligibility but rarely achievable in most environments
A	0,74	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, parliaments, courts, Assistive Hearing Systems (AHS)	High speech intelligibility
B	0,7	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, teleconferencing, parliaments, courts	High speech intelligibility
C	0,66	Complex messages, unfamiliar words	Lecture theatres, classrooms, concert halls	Good speech intelligibility
D	0,62	Complex messages, familiar words	Concert halls, modern churches	High quality PA systems
E	0,58	Complex messages, familiar context	PA systems in shopping malls, public buildings offices, VA systems, cathedrals	Good quality PA systems
F	0,54	Complex messages, familiar context	Shopping malls, public buildings offices, VA systems	Target value for VA systems
G	0,5	Simple messages, familiar words	VA and PA systems in difficult acoustic environments	Normal lower limit for VA systems
H	0,46	Simple messages, familiar context	VA and PA systems in very difficult spaces	
I	0,42		Not suitable for PA systems	
J	0,38		Not suitable for PA systems	
U	<0,36		Not suitable for PA systems	

NOTE 1 These values should be regarded as minimum target values.
NOTE 2 Perceived intelligibility relating to each category will also depend on the frequency response at each listening position.
NOTE 3 The STI values refer to measured values in sample listening positions or as required by specific application standards.

Figura 2. Evaluación objetiva del STI en función del recinto.

3. CRITERIOS NORMATIVOS

En España, la implantación de un sistema PAVA es de obligado cumplimiento, según indica el Código Técnico de la Edificación (CTE) en el Documento Básico de Seguridad en caso de incendio (DB-SI), para aquellos recintos de pública concurrencia con un aforo mayor de 500 personas o una superficie mayor de 500 m² y uso hospitalario en todos los casos. Para entornos industriales, actualmente está recomendado en superficies superiores a 10.000 m², estando prevista su obligatoriedad a futuro para superficies superiores a 10.000 m² y densidad de ocupación mayor a 3 personas por cada 100 m² [6].

Para el diseño de sistemas PAVA el reglamento anterior hace referencia actualmente a las normas UNE 23007-14 y la UNE EN 60849, que especifican los requisitos y las directrices para los sistemas utilizados en edificios y áreas públicas con el propósito de transmitir mensajes de alarma y evacuación en situaciones de emergencia, como incendios u otras situaciones de peligro.

Los criterios de diseño que determina la legislación actual son:

- Un nivel sonoro mínimo de 65 dBA, o 5 dBA por encima del ruido de fondo equivalente en 30s, y nunca superior a 120dBA. En el caso de personas que estén durmiendo, el nivel sonoro mínimo en cabecera será de 75 dBA.
- Un nivel de STI mayor o igual a 0,5.

Los reglamentos de protección contra incendios (RIPCI para instalaciones y RSCIEI para entornos industriales)

tienen previsto referenciar en su próxima revisión la norma UNE EN 23007-32 para el futuro diseño de sistemas PAVA [7]. Esta norma es parte de la serie más reciente de normas europeas EN 54 relacionadas con sistemas de alarma y evacuación por voz. En esta nueva norma, indica criterios de diseño para sistemas de alarma y evacuación por voz:

- Un nivel de sonoro de, al menos, 10 dB por encima del nivel de ruido ambiente.
- Un nivel de inteligibilidad del habla media en el 90% de cada área acústica que se defina no inferior a 0,5 STI, siendo el mínimo absoluto permitido 0,45 STI.

Esta nueva norma UNE EN 23007-32 se centra exclusivamente en sistemas de alarma por voz utilizados en situaciones de evacuación de emergencia. Está diseñada específicamente para sistemas de sonido que utilizan voz humana o sintetizada para transmitir mensajes de alarma y evacuación, estableciendo requisitos detallados relacionados con la calidad del sonido, la inteligibilidad, la distribución de altavoces, la resistencia al fuego y otros aspectos técnicos específicos para estos sistemas.

3.1. Nuevos métodos para el cálculo de la inteligibilidad: prescriptivo y detallado

La nueva norma propone dos métodos para diseñar el VAS (del inglés, Voice Alarm System), siendo el prescriptivo y el detallado [8], en función del tipo de recinto.

El método prescriptivo permite que los resultados puedan ser anticipados o alcanzados, siempre que el área acústicamente diferenciable (ADA) en estudio sea simple, de tal manera que:

- El tiempo de reverberación no sea mayor a 1'3 segundos en 500Hz, 1kHz, 2kHz;
- El nivel de ruido ambiente sea menor que 65dBA.
- El nivel de presión sonora de los tonos de alerta y mensaje será mayor que 75 dB L_{AeqT} (siendo T la duración del mensaje).
- Altura de instalación de altavoces inferior a 5 m.
- Distancia entre altavoces adyacentes inferior a 6 m (y de 12 m para altavoces bidireccionales).
- Distancia no obstruida entre altavoz y oyente no mayor a 4,5 m para altavoces unidireccionales, y de 6 m para altavoces bidireccionales.

De este modo, la norma predice asegurar el cumplimiento de la inteligibilidad para ADAs con dichas características.

Por otro lado, el método detallado se deberá usar en todas las ADAs donde las recomendaciones para el método prescriptivo no se puedan medir o predecir. Los diseños deberán ser realizados por personal adecuadamente cualificado y deberán seguir los requisitos para el uso del STI como una herramienta predictiva de diseño.

Área del ADA (m ²)	Número mínimo de puntos de medición
Menos de 25	1
25 a menos de 100	3
100 a menos de 500	6
500 a menos de 1500	10
1500 a menos de 2500	15
Mayor de 2500	15 por cada 2500 m ²

Figura 3. Número mínimo de puntos de medición.

La norma establece dos tipos de métodos detallados posibles:

- Cálculos basados en parámetros predichos estadísticamente, predicción del STI mediante la matriz de función de transferencia de modulación completa (MTF), según UNE-EN 60268-16.
- Modelo de simulación por ordenador basadas en respuestas al impulso simuladas, mediante modelo tridimensional y ajustado al tiempo de reverberación previsto o medido, según UNE-EN 60268-16.

Estas herramientas para el modelo de simulación, que fundamentan su simulación en la teoría de rayo sonoro [2], deben considerar:

- Una respuesta al impulso simulada de 1,6 s mínimo de duración.
- El umbral de audición absoluto, los efectos de enmascaramiento auditivo y el espectro de ruido ambiente previsto.
- El espectro de frecuencias de la voz para el cálculo de la relación señal a ruido, incluyendo cualquier equalización específica para el proyecto.

3.2. Verificación del nivel de inteligibilidad en campo

Para el procedimiento de medición y cálculo del índice STI se debe tomar la medida de inteligibilidad del habla dentro de cada ADA en varios puntos de medición [8], en función de la superficie, según lo indicado en la Figura 3.

Para la medición de la inteligibilidad, podrán ser utilizados los métodos directos e indirectos [1], siendo los primeros aquellos que utilizan una señal test modulada (utilizados en la práctica para medir la inteligibilidad de los sistemas PAVA), y los segundos basados en la respuesta al impulso del sistema (solo aplicables a sistemas lineales invariantes en tiempo).

Se deberán tener en cuenta las correcciones según si los tiempos de reverberación, ruido ambiente, y los niveles de habla de emergencia existentes son diferentes en la medición respecto a los usados para el diseño [1].

Aun así, existen situaciones con entornos excesivamente reverberantes y ruidosos donde los niveles marcados no se pueden lograr y la norma los tiene en cuenta. En esos casos se deberá acordar un nivel de inteligibilidad por el comprador y la AC (Autoridad Competente) [8]. El comprador, en consulta con la AC, deberá definir y documentar claramente las responsabilidades y por parte de quién serán asumidas dentro del proyecto general.

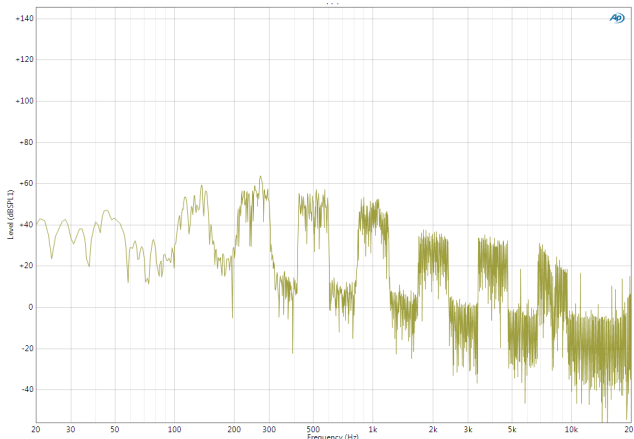


Figura 4. Espectro de la señal STIPA.

4. ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE PRUEBA STIPA

Para poder optimizar el nivel de inteligibilidad en un recinto, conviene conocer la estructura de la señal utilizada para la verificación en campo.

La norma UNE-EN 60268-16 menciona los métodos Full STI, que mide las 98 combinaciones de modulación y frecuencia, y el método STIPA, que presenta solo 14 combinaciones, permitiendo de este modo realizar la medición de inteligibilidad mediante equipos portátiles. El uso del método STIPA es una simplificación del método Full STI que permite evaluar el STI de manera rápida y fiable.

Ambos métodos utilizan una señal basada en ruido rosa adaptada al nivel de la voz humana, modulado de forma sinusoidal con 14 frecuencias distintas en 7 octavas de frecuencia diferentes. Estas modulaciones imitan las fluctuaciones de la intensidad de la voz existentes al emitir un mensaje. El resultado se expresa en una escala de 0 a 1, donde 0 representa una inteligibilidad pobre y 1 una inteligibilidad perfecta.

La señal STIPA, que se define como una señal de habla sintética para evaluar la inteligibilidad, presenta el espectro representado en la Figura 4.

Esta información nos permite analizar el porcentaje de contribución de cada una de las bandas de tercio de octava al nivel STI definitivo [4].

Según aprecia en la Figura 5, esta contribución otorga un mayor peso a la banda de octava de 2 kHz, junto con las bandas de 1 kHz y 4 kHz. Esto nos permitirá planificar ajustes para mejorar la respuesta en frecuencia del sistema.

5. AJUSTES DEL SISTEMA RESPECTO DE LA SEÑAL STIPA Y MEJORA DEL STI

A nivel de arquitectura de sistema VAS, la mejora del nivel de inteligibilidad se puede llevar cabo aplicando diversas medidas predictivas y correctivas, se citan varias a continuación:

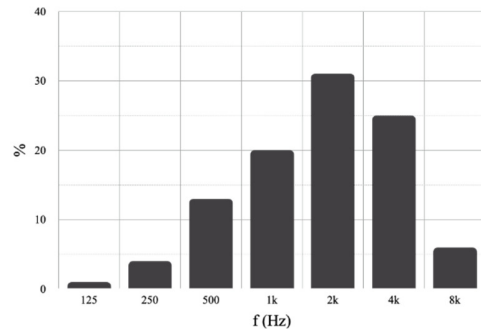


Figura 5. Porcentaje de contribución a STI por banda de octava

- Adecuada respuesta en frecuencia de los transductores y bajo nivel de distorsión.
- Adecuada cobertura con una óptima distribución y angulación, evitando cancelaciones y retardos entre transductores
- Implantar sistemas de control automático de ganancia para mejorar la relación señal-ruido.
- Ajustar la respuesta en frecuencia de salida del sistema al espectro de la señal STIPA.

Nos centraremos en esta última, que propone una ecualización paramétrica por bandas a la salida de la amplificación, con el objetivo de realzar las frecuencias clave del espectro del habla, según la acústica del recinto.

De forma genérica, la mejora de un sistema de ecualización para el refuerzo de sonido del habla elimina las frecuencias inferiores a 125Hz, se mantiene plana en el rango de 125Hz a 2kHz, dado que la mayor parte de la inteligibilidad del habla humana se centra en el rango de 1 a 2 kHz, según se puede ver en la Figura 6. Aumentar las frecuencias por encima de este rango aumentará la sibilancia, pero no necesariamente mejorará la inteligibilidad [9].

Por tanto, conociendo la influencia de las bandas de contribución de la señal al STI y el espectro STIPA, se deberá determinar la mejor respuesta en frecuencia mediante el procesamiento digital de la señal, centrado en la banda de 1 y 2 kHz de tercio de octava.

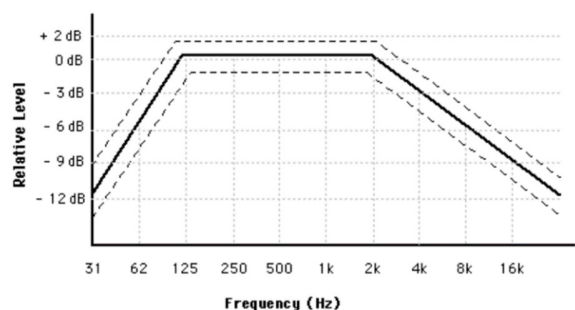


Figura 6. Curva de ecualización para la mejora del habla.

6. CASO REAL

Se estudia la renovación del sistema de una emblemática estación metropolitana, tras su reciente reforma integral. En este caso, se analizará el vestíbulo principal (hall).

6.1. Análisis previo de la problemática presentada

Al tratarse de un recinto en construcción, no es posible tomar mediciones previas, por lo que el RT se deberá estimar en base a las características arquitectónicas del recinto y las propiedades absorbentes de los materiales.

La Propiedad, por motivos estéticos, solo permite la instalación de un tipo determinado de transductores en ubicaciones concretas.

6.2. Estudio de simulación acústica

Por el tipo de recinto y sus características, se refiere al método detallado, modelando en 3D el área en estudio, ubicando las diferentes áreas de audiencia a 1,6 m y estableciendo el posicionamiento requerido de los transductores en la herramienta de predicción acústica.

El RT es determinado por la herramienta en base a la arquitectura modelada y la absorción de los materiales constructivos, obteniendo resultados de 2,26 s en la banda de 500 Hz, 2,24 en 1 kHz y 2,63 en 2 kHz.

El nivel de ruido es estimado en base a la experiencia en recintos similares, estableciéndose en 80 dB.

Para el cálculo del STI, teniendo en cuenta el enmascaramiento de señal y el ruido de fondo, se obtiene el espectrograma de la Figura 7, resultando un valor de 0.39 en el área en estudio.

Se considera que los resultados se ajustan a lo esperado considerando los tiempos de reverberación y el enmascaramiento de señal, además de las limitaciones establecidas en cuanto a las posibilidades de instalación.

6.3. Mediciones de STIPA en campo

Para la verificación de los resultados en campo, se estiman 3 puntos de medición al ser una superficie 95,66 m².

Se descartará las superficies menores a 10 m², así como el 10% de peores registros de STI, realizando la media aritmética del resto de resultados para cada ADA [8].

Para el ruido de fondo, se registra un valor de 75,4 dB.

La Tabla 1 muestra los valores tomados en los tres puntos del ADA en estudio:

Tabla 1. STI y SNR obtenido en campo.

ADA	STI	L _{Aeq10} [dBA]	SNR [dB]
Hall 01	0,45	88,0	12,6
Hall 02	0,44	87,1	11,7
Hall 03	0,45	84,9	9,5

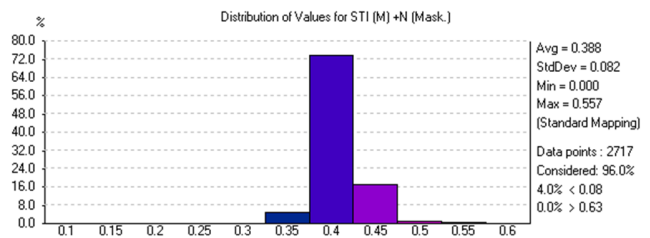


Figura 7. Valores de STI + N(Mask) broadband.

Se hace necesario, por tanto, aplicar medidas correctivas para poder mejorar los resultados.

6.4. Medidas correctivas aplicadas

Para mejorar los niveles de STI y SNR, se lleva a cabo:

- El refuerzo del campo sonoro directo, aumentando la densidad de altavoces, y realizando ajustes en la orientación para mejorar la cobertura
- La implementación de un sistema de CAG, para el ajuste a tiempo real del SNR, mitigando el efecto del enmascaramiento.
- El procesamiento digital de la señal de salida, para la mejora de la inteligibilidad de palabra, realizando la ecualización paramétrica de bandas mostrada en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecualización paramétrica para la mejora del STI.

Frecuencia [Hz]	Q	Ganancia [dB]
60	0,3	- 10
2.000	0,3	+ 6
5.000	0,3	+ 6
8.000	0,3	+3

6.5 Verificación final

Tras las medidas correctivas aplicadas, se retoman las mediciones en campo, consiguiendo una mejora de la inteligibilidad para obtener los valores de la Tabla 3, siendo una media de 0,46 para el STI y una SNR por encima de los 10 dB, para el ADA en estudio.

Tabla 3. STI y SNR obtenido tras las medidas correctivas.

ADA	STI	L _{Aeq10} [dBA]	SNR [dB]
Hall 01	0,47	88,1	12,7
Hall 02	0,45	88,0	12,6
Hall 03	0,46	85,9	10,5

Se concluye, por tanto, que las medidas correctivas adoptadas son satisfactorias.

7. CONCLUSIONES

La inteligibilidad y el nivel sonoro son los principales parámetros de diseño en los sistemas de alarma por voz para asegurar la correcta transmisión del mensaje.

Existe una dependencia física de factores determinantes en un sistema VAS, como son el RT y el ruido de fondo, que no depende del tipo de sistema propuesto.

Un entorno acústicamente favorable es fundamental y causa principal para asegurar el nivel deseado de STI, siendo esencial mantener una excelente cobertura y un adecuado ajuste del sistema en las bandas de influencia de la voz y el espectro de señal STIPA.

La nueva norma simplifica la fase de diseño para entornos simples, lo que permite agilizar la implantación de los sistemas de alarma por voz; del mismo modo, establece directrices para recintos complejos que únicamente serán diseñados por personal adecuadamente cualificado. Esta cualificación es clave para establecer qué profesionales pueden llevarlo a cabo, que deberá fijar la Administración.

La nueva norma establece también la figura de Autoridad Competente como aquel organismo autorizado para regular y acreditar el cumplimiento de los requisitos de diseño. Este punto también es clave para asegurar el correcto diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas VAS.

Para entornos en los que el elevado nivel de RT dificulta poder llegar a valores de STI adecuados, la nueva norma permite establecer excepciones mediante acuerdos firmados con la AC, lo que facilita implantar sistemas VAS en recintos que, si bien no permiten llegar al nivel de STI o SNR adecuados, permitirá un refuerzo adicional certificado a los sistemas de evacuación convencionales (sirenas o avisos luminosos), mejorando el nivel de seguridad en caso de evacuación. En definitiva, salvando vidas.

8. REFERENCIAS

[1] CENELC. BS EN 60268-16:2011. "Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index". Bruselas. Agosto 2011.

[2] C. M. Harris, "Manual de medidas acústicas y control de ruido", McGraw-Hill, ISBN: 84-481-1619-4. Madrid. 1991.

[3] J. Barrera, J. M. Díaz, "La inteligibilidad en los sistemas de evacuación por voz", Málaga, 2020. Link: <https://lda-audiotech.com/category/articulos/blog-tecnico/>

[4] F. Alton Everest, Master Handbook of acoustics, McGraw-Hill, 1981.

[5] J. Ramis Soriano, A. Uris Martínez, J. Alba Fernández y J. A. Martínez Mora, "Curso Experimental de acústica de salas", Universidad Politécnica de Valencia, p. 145-159. SUPPV-98.373. Gandía. 1998.

[6] J. Barrera, "¿Cuándo es obligatorio un sistema de evacuación por voz en España?", Málaga, 2018. Link: <https://lda-audiotech.com/category/articulos/blog-tecnico/>

[7] Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, "Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales" (Borrador 15 de septiembre 2022).

[8] AENOR. 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.

[9] Shure, "Equalization and speech intelligibility". 2020. Link: <https://service.shure.com/s/article/equalization-and-speech-intelligibility>

[10] NTi Audio, "How do we measure Speech Intelligibility STI?". Link: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/how-do-we-measure-speech-intelligibility-sti>

[11] AENOR. UNE EN 23007-14, "Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 14: planificación, diseño, instalación, puesta en servicio, uso y mantenimiento". Madrid. Diciembre 2009.

[12] AENOR. UNE-EN 60849, "Sistemas electroacústicos para servicios de emergencia". Madrid. Mayo 2002.

[13] P. Goli, M. Reza Karami-mollaei, "Speech intelligibility improvement in noisy environments based on energy correlation in frequency bands", Digital Signal Processing, Volume 62. 2017. Pages 238-248.