



HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE REFUERZO SONORO

Hernández-Pérez E.¹, Campos-Herrera D.I.¹, Navarro-Mesa J. L.¹, Guerra-Moreno I. D.¹, Ravelo-García A. G.¹, Quintana-Morales P. J.¹ y Martín-González S. I.¹

¹ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España.

eduardo.hernandez@ulpgc.es, diego.campos101@alu.ulpgc.es, juanluis.navarro@ulpgc.es, id.guerra.moreno@gmail.com, antonio.ravelo@ulpgc.es, pedro.quintana@ulpgc.es, sofia.martin@ulpgc.es

Resumen

El control de la realimentación acústica en los sistemas de refuerzo sonoro requiere una adecuada planificación, ya que cuando se cierra el lazo de realimentación, en cualquiera de sus grados, las consecuencias son indeseables. Una herramienta que permita su predicción puede resultar de gran ayuda, tanto en el ámbito profesional como en el ámbito docente. En el primer caso permite al ingeniero de sonido planificar y simular, previendo las condiciones que pueden provocar inestabilidad, en el segundo caso puede usarse como herramienta de formación para futuros ingenieros de sonido, simulando situaciones no siempre accesibles que faciliten la comprensión y el tratamiento del fenómeno. La herramienta desarrollada se ha dividido en secciones cada una en su contexto (acústico, electroacústico y geométrico), lo que creemos facilita una actuación más directa con parámetros de una misma clase, separando además las causas particulares del fenómeno.

Palabras-clave: Realimentación Acústica, Refuerzo Sonoro, Sistemas Electroacústicos, Simulación de Sistemas.

Abstract

Acoustic feedback control in sound reinforcement systems requires proper planning, as when the feedback loop is closed, in any degree, the effects are undesirable. A tool that allows the prediction can be helpful, both in professional and educational contexts. In the first case the sound engineer can plan and simulate in advance the conditions that can cause instability, in the second case it can be used as a training tool for future sound engineers, simulating situations that are not always accessible to facilitate the understanding and treatment of the phenomenon. The developed tool has been divided into sections each in its context (acoustic, electroacoustic and geometric), what we believe provides a more direct action with parameters of the same class, also separating the particular causes of the phenomenon.

Keywords: Acoustic Feedback, Sound Reinforcement, Electroacoustic Systems, Simulation Systems.

PACS no. 43.38.+n, 43.60.+d, 43.58.+z, 43.55.+p

1 Introducción

Cuando un sistema de Refuerzo Sonoro es inestable puede aparecer el problema de la realimentación acústica. Este se manifiesta cuando la señal de salida del sistema electroacústico regresa al micrófono, en una determinada proporción, a través del acoplo acústico proporcionado por el medio aire. El problema provoca con frecuencia una degradación significativa de las prestaciones de los sistemas de refuerzo sonoro. En el caso peor, el sistema entra en oscilación provocándose la aparición de un característico y muy molesto "pitido", cuya tonalidad dependerá de varios factores [7].

Se trata de un fenómeno conocido y tratado desde hace más de cincuenta años [8], con propuestas de soluciones de control automático como [6] que data de 1964 y [2] de 2013. Sin embargo, sorpresivamente, una gran mayoría de los técnicos de sonido prefieren aplicar los métodos manuales para el control de la realimentación acústica [8], la razón fundamental reside en el tiempo necesario para controlar el fenómeno, mayor en los sistemas de control automático.

En este contexto proponemos el desarrollo de una herramienta con capacidad para simular las distintas variables y condiciones que intervienen en la aparición del citado fenómeno. Por ejemplo, en la planificación de una instalación de refuerzo sonoro puede ser una herramienta que ayude a prevenirlo. En este contexto, las premisas fundamentales que debe reunir esta herramienta son: acceso a todos los equipos, dispositivos y elementos que intervienen en el proceso, facilidad para almacenar escenarios y configuraciones, un nivel aceptable de precisión y fiabilidad y una base de datos de dispositivos, equipos y materiales acústicos (accesible y fácilmente ampliable), como las principales. Además, tendría una doble utilidad, por un lado la docente en el entrenamiento de técnicos noveles, y por otro lado para profesionales en la producción de eventos.

En la herramienta que hemos desarrollado se ha tratado el problema desde el concepto de PAG (Potential Acoustic Gain, Ganancia Acústica Potencial) [1 y 3]. Este parámetro depende de las prestaciones acústicas del escenario considerado (teatro, auditorio, sala multiusos, instalación deportiva, etc.), la ubicación de dispositivos tales como: micrófonos y cajas acústicas, y de las características eléctricas de los componentes del sistema electroacústico (amplificadores, ecualizadores, mezclador, micrófonos y cajas acústicas).

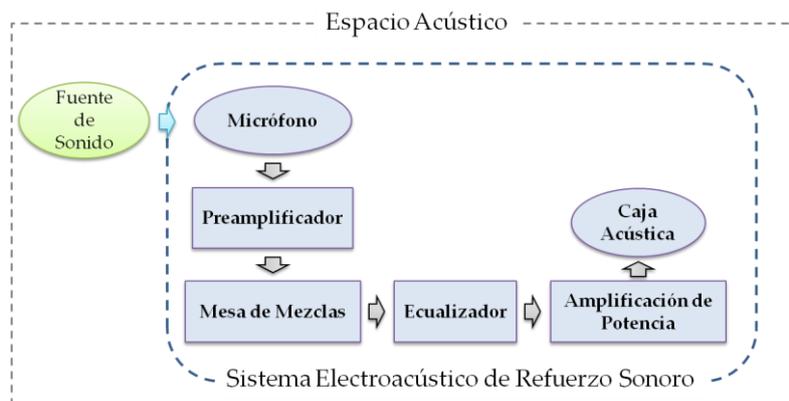


Figura 1 – Elementos principales de un Sistema de Refuerzo Sonoro tipo.

2 Metodología del Desarrollo

Para el desarrollo de la herramienta establecemos un sistema de refuerzo sonoro tipo (Figura 1), como se puede observar está compuesto de Fuente de Sonido, Micrófono, Preamplificador, Mesa de Mezclas, Ecuilizador, Amplificador de Potencia y Caja Acústica autoamplificada, además hemos de

contemplar el Espacio Acústico dónde el sistema se encuentra inmerso. Dentro del sistema tipo de la Figura 1 se distingue el Sistema Electroacústico de Refuerzo Sonoro; cadena de dispositivos y equipos que realiza el tratamiento de la Señal Acústica desde que es captada hasta que es devuelta al Espacio Acústico.

Cada una de estas "secciones" aportará al conjunto unas características específicas, además para cada una de ellas se van a contemplar variables que permitan, una vez definido el mismo, ajustar y controlar posibles inestabilidades.

2.1 Fuente de Sonido

La fuente de sonido en este tipo de sistemas puede tener fundamentalmente los siguientes orígenes: voces humanas (femeninas o masculinas) o instrumentos musicales. En el caso concreto de la voz humana podemos, para los fines de nuestro desarrollo, contemplar las siguientes características y parámetros de relevancia: tipo, respuesta en frecuencia, factor de directividad, nivel de presión sonora y distancia hasta el micrófono.

2.2 Micrófono

Se trata del primer eslabón de la cadena electroacústica y por tanto se le confiere un concurso fundamental, en este caso los parámetros de interés son: sensibilidad, respuesta en frecuencia, directividad y ubicación dentro del espacio acústico (posición espacial y orientación), por tanto estos serán los grados de libertad con los que debemos dotarnos para estudiar la estabilidad del sistema con respecto a este dispositivo. Por ejemplo, de entre los parámetros citados, la directividad, quizás sea el más decisivo a la hora de dotar de estabilidad a un sistema de refuerzo sonoro. En la Figura 2, están relacionados la distancia entre caja acústica y micrófono (D_1), la dirección de incidencia sobre un micrófono cardioide (cada trazo una dirección) y la PAG, observamos como el empleo de micrófonos directivos incrementa los márgenes de PAG, todo ello en condiciones de campo libre.

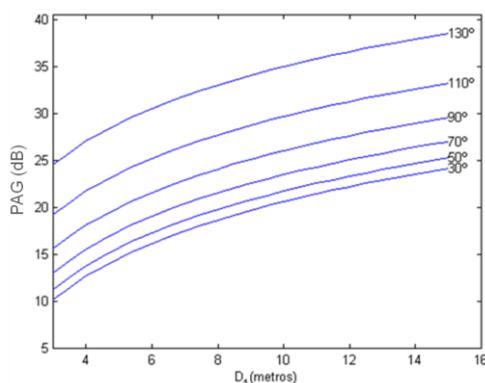


Figura 2 – PAG versus directividad y distancia caja acústica-micrófono (D_1).

2.3 Preamplificador, Mesa de Mezclas y Ecuador

Estos equipos ejercen principalmente una función de control sobre los niveles eléctricos de la señal (control de la ganancia del sistema de refuerzo, cadena electroacústica), se trata de un control "grueso" sobre la estabilidad del sistema, cuyo límite vendrá impuesto por la PAG del sistema en su conjunto para una disposición dada. El ecualizador permite incidir sobre la ganancia por bandas de frecuencias



lo que supone un control "fino" de la ganancia total, p.ej. aquí podemos modificar la ganancia de aquella banda donde se manifiesta la inestabilidad.

2.4 Amplificador de Potencia y Caja Acústica

En esta parte del sistema se ejerce, además de un control grueso sobre la ganancia final, la definición de la localización de la caja acústica. En nuestro caso hemos agrupado en un mismo apartado ambos equipos puesto que vamos a considerar, como suele ser habitual hoy en día en estas instalaciones, una caja acústica autoamplificada. Las características y parámetros de interés en este caso son: respuesta en frecuencia, directividad, sensibilidad, potencia, impedancia y localización (posición espacial y orientación)

2.5 Espacio Acústico

En el espacio acústico hemos de considerar características de distinta naturaleza: geométricas y acústicas. Las primeras están relacionadas con la disposición de micrófonos y altavoces a través del mismo, así como las dimensiones físicas del recinto y su geometría. En el aspecto acústico principalmente destacan las características absorbentes de los límites del espacio acústico, la forma geométrica de esos límites y las dimensiones de los objetos que forman parte de ese espacio acústico.

Una cuestión básica será el calculo y representación de la distribución de los niveles sonoros proporcionados por el sistema de sonorización, esta tarea es posible realizarla aplicando distintas metodologías: acústica geométrica (método de las imágenes o método de los rayos), acústica ondulatoria (p.ej. FEM BEM) o métodos estadísticos [5], en cualquier caso un aspecto a considerar será la carga computacional que conlleva cada uno de estos métodos frente al grado de precisión requerido. En el caso que nos ocupa el requisito básico es diseñar una herramienta de respuesta rápida, que permita obtener resultados para su aplicación en un tiempo prudencial, en este sentido una precisión de $\pm 2\text{dB}$ creemos que es aceptable.

La intensidad acústica dentro del espacio acústico considerado la vamos a calcular mediante la expresión (1) [4]:

$$I(\mathbf{r}, \theta) = \frac{W_a}{4 \cdot \pi \cdot |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2} Q(\theta) + \frac{4W_a}{R} \quad (1)$$

donde $I(\mathbf{r}, \theta)$ es la intensidad acústica (w/m^2), en campo directo más campo reverberante, en la posición $\mathbf{r}(x, y, z)$ y dirección θ , W_a es la potencia acústica radiada por la fuente, $Q(\theta)$ es el factor de directividad de la fuente en la dirección θ , $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$ es la posición espacial de la fuente y R la constante del espacio acústico (relación entre el área de absorción equivalente y el coeficiente de absorción media).

Además de los campos directo y reverberante, vamos a considerar como más significativas únicamente las reflexiones de primer orden. La intensidad total, $I_T(\mathbf{r}, \theta)$, en cada uno de los puntos considerados dentro del espacio acústico se calculará según (2).

$$I_T(\mathbf{r}, \theta) = \frac{W_a}{4 \cdot \pi \cdot |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2} Q(\theta) + \frac{4W_a}{R} + \sum_{i=1}^6 \frac{W_a}{4 \cdot \pi \cdot |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|^2} Q_i(\theta_i) \cdot (1 - \alpha_i) \quad (2)$$

donde los $Q_i(\theta_i)$ son los factores de directividad en las orientaciones de cada una de las reflexiones de primer orden e igualmente $\mathbf{r}_i(x_i, y_i, z_i)$ las distancias recorridas en cada caso, siendo α_i los coeficientes de absorción de cada superficie límite.

2.6 Estabilidad del Sistema

Atendiendo a la teoría de sistemas el esquema de bloques de la Figura 1 puede simplificarse según aparece en la Figura 3, donde se observa el típico sistema de lazo cerrado. Este sistema está integrado por dos bloques, $G_0(e^{j\omega})$ que engloba a todos los dispositivos y equipos que conforman la cadena electroacústica del sistema de refuerzo sonoro, y $B(e^{j\omega})$ que comprende el trayecto de propagación del sonido desde la caja acústica a la audiencia, influido principalmente por las características del recinto y los distintos fenómenos de propagación (divergencia, reflexión, difracción, etc.). Al sistema completo lo denominamos $G_r(e^{j\omega})$. El resto de parámetros que aparecen en la Figura 3, $P_s(e^{j\omega})$, $P_i(e^{j\omega})$ y $P(e^{j\omega})$ representan las ondas de presión sonora de la fuente de sonido (p.ej. locutor), la incidente total sobre el micrófono y la que incide en la posición del micrófono procedente de la caja o cajas acústicas ubicadas en el mismo espacio acústico.

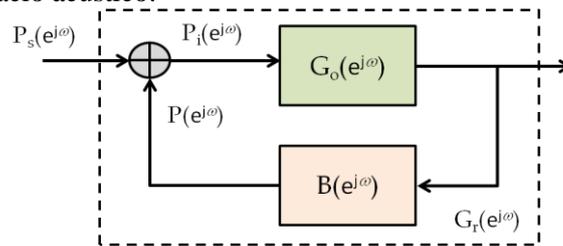


Figura 3 – Sistema en lazo cerrado en representación de un Sistema de Refuerzo Sonoro.

$$G_r(e^{j\omega}) = \frac{G_0(e^{j\omega})}{1 - G_0(e^{j\omega}) \cdot B(e^{j\omega})}. \quad (3)$$

La función de transferencia (3) correspondiente al sistema de la Figura 3, nos permite estudiar la estabilidad de ese sistema y por ende la estabilidad de un sistema de refuerzo sonoro. Para ello pondremos especial interés en la respuesta del lazo de realimentación, el producto $G_0(e^{j\omega}) \cdot B(e^{j\omega})$, distinguimos: respuesta en magnitud del lazo $|G_0(e^{j\omega}) \cdot B(e^{j\omega})|$ y su respuesta en fase $\angle G_0(e^{j\omega}) \cdot B(e^{j\omega})$. El criterio de estabilidad de Nyquist nos dice que si existe una frecuencia para la que se cumpla (4) el sistema será inestable [7].

$$|G_0(e^{j\omega}) \cdot B(e^{j\omega})| \geq 1 \quad \text{y} \quad \angle G_0(e^{j\omega}) \cdot B(e^{j\omega}) = n \cdot 2\pi, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (4)$$

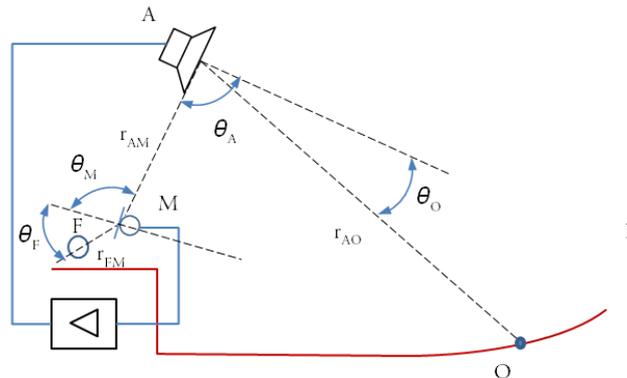


Figura 4 – Sistema de Refuerzo Sonoro simplificado, donde M es posición del micrófono, A posición de la caja acústica, F posición de la fuente y O la posición del oyente.

Sobre el esquema de la Figura 3 buscamos un modelo más tangible, basado en parámetros de uso común en este tipo de instalaciones, supondremos que disponemos de un sistema de refuerzo sonoro, básico, compuesto por un sólo micrófono (M) y una sola caja acústica (A), más un amplificador de audio (Figura 4). Siendo r_{ij} las distancias entre los distintos elementos y θ_i la dirección hacia cada uno de los puntos de interés del sistema en el contexto de la realimentación acústica. La condición de inestabilidad dada en (4) es equivalente [1] a la expresada en (6), es decir, si se igualan el nivel de presión sonora de la caja acústica sobre el micrófono (L_{AM}) (5) con el producido por la fuente sobre el micrófono (L_{FM}) (5), el sistema entrará en oscilación. Además, se ha tenido en cuenta que el nivel producido por la caja acústica será el necesario para alcanzar una cierta relación señal (L_{AO}) a ruido (N) sobre el oyente (O), típicamente 25 dB para salas de conferencias ($L_{AO}-N = 25$ dB). Las expresiones dadas en (5) y (6) constituyen el modelo que usaremos en el desarrollo de nuestra herramienta.

$$L_{AM} = L_W^A + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q_A(\theta_A) \cdot Q_M(\theta_M)}{4 \cdot \pi \cdot r_{AM}^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$L_{FM} = L_W^F + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q_M(\theta_F)}{4 \cdot \pi \cdot r_{FM}^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (5)$$

$$L_W^A = N + 25 - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q_A(\theta_O)}{4 \cdot \pi \cdot r_{AO}^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$L_{AM} = L_{FM} \quad (6)$$

3 Descripción y Aplicación de la Herramienta Software

La herramienta software ha sido desarrollada en entorno MATLAB, siguiendo la metodología expuesta en el apartado anterior. En su concepción se ha tenido muy en cuenta que el resultado fuera muy visual e intuitivo para usuarios instruidos en el ámbito de los sistemas que aquí se tratan. Se fundamenta en cuatro bloques o contextos principales: administración del proyecto, geometría y disposición de los elementos, sistema de refuerzo sonoro y resultados.

3.1 Administración del proyecto

El primer paso será la creación de un proyecto, de manera que todos los datos introducidos son recuperables en cualquier momento, lo que permitirá seguir experimentando con el mismo más adelante, además facilita al usuario guardar trabajos ya realizados que pueden serle útil más adelante.

3.2 Geometría y Disposición

En este bloque se introducen los datos relativos a las dimensiones y geometría del recinto. Por cada uno de los límites del recinto se tienen que facilitar los coeficientes de absorción, asignando el porcentaje de recubrimiento para un determinado paramento (Figura 5.a). Con la información proporcionada en este bloque, es posible el cálculo del coeficiente de absorción medio y de la constante del espacio acústico (R). Un último paso en este bloque sería ubicar el micrófono y las cajas acústicas.

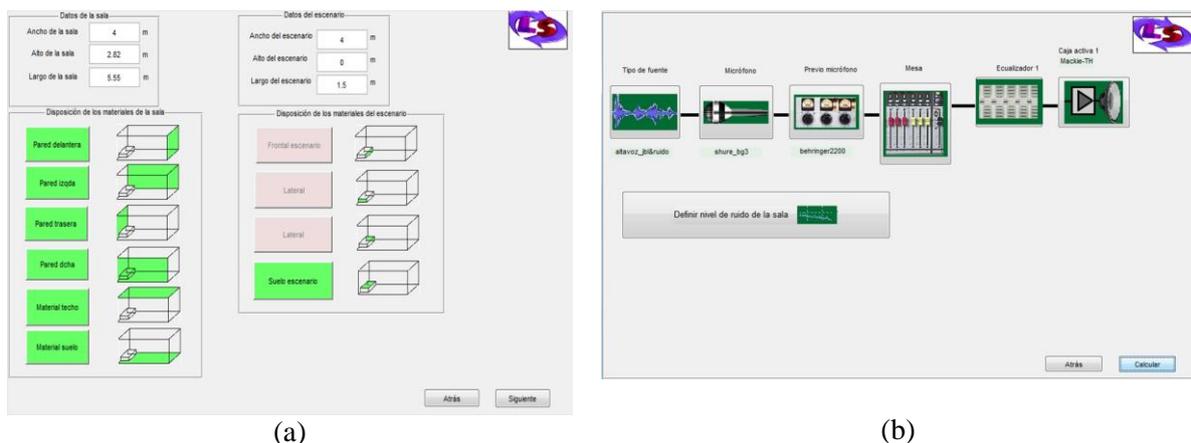


Figura 5 – Interfaz del bloque Geometría y Disposición (a). Interfaz del bloque de Sistema de Refuerzo (b).

3.3 Sistema de refuerzo

Se definen aquí las características de cada uno de los elementos del sistema de refuerzo sonoro, la interfaz la podemos ver en la Figura 5.b. El usuario podrá interactuar con cada equipo y o dispositivo con sólo llevar el cursor y picar sobre cualquiera de ellos se despliega un menú contextual que le permite seleccionar las especificaciones y parámetros del mismo, p.ej. en la Figura 6.a tenemos el caso del micrófono. Esta interfaz está relacionada con las condiciones del bloque G_0 .

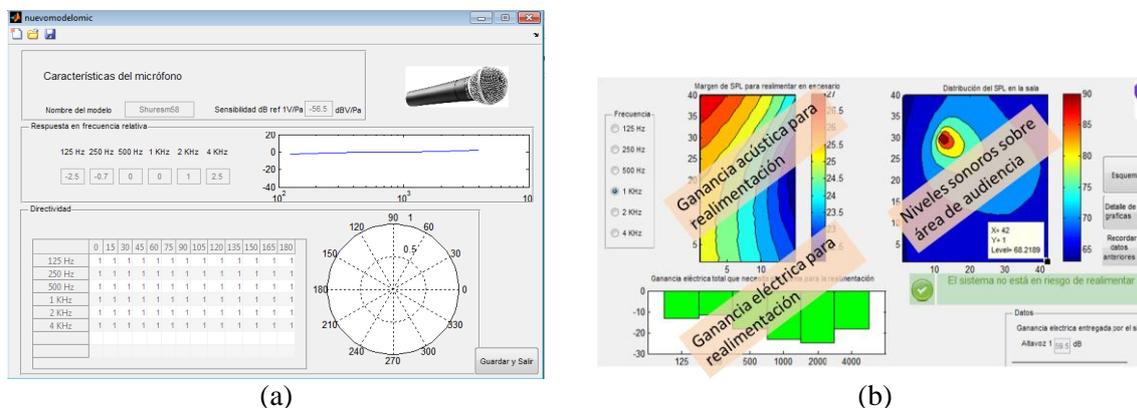


Figura 6 – Interfaz para selección y caracterización del micrófono (a). Interfaz del bloque de Resultados (b).

3.4 Resultados

En este bloque obtendremos los resultados del estudio de la realimentación sonora, que se presenta fundamentalmente en tres secciones (Figura 6.b). Primeramente una sección que incorpora la gráfica de la distribución sobre el escenario de la ganancia acústica necesaria para alcanzar la realimentación, en segundo lugar la distribución de los niveles sonoros sobre el área de audiencia y en tercer lugar la ganancia eléctrica, por octavas, que resta para alcanzar la realimentación y que calculamos en base a la expresión (7), donde G_E es la ganancia eléctrica total (bloque G_0), S_M sensibilidad del micrófono, Z_A

la impedancia eléctrica promedio de la caja acústica, η_A el rendimiento de la caja acústica, el resto de parámetros ya sido introducido anteriormente.

Según los resultados el sistema puede emitir un diagnóstico de tipo general sobre la situación con respecto a la realimentación, grado de riesgo respecto a la ocurrencia de la realimentación acústica (Figura 6.b).

$$\Delta = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\left(10^{\frac{G_E}{10}} \rho_o \cdot c \cdot 10^{\frac{S_M}{10}} \right)}{Z_A} \eta_A \left[\frac{Q_A(\theta_A) Q_M(\theta_M)}{4 \cdot \pi \cdot r_{AM}^2} + \sum_{i=1}^6 \frac{Q_M(\theta_M) Q_A(\theta_{AMi})(1 - \alpha_i)}{4 \cdot \pi \cdot r_{AMi}^2} + \frac{4}{R} \right] \right) \quad (7)$$

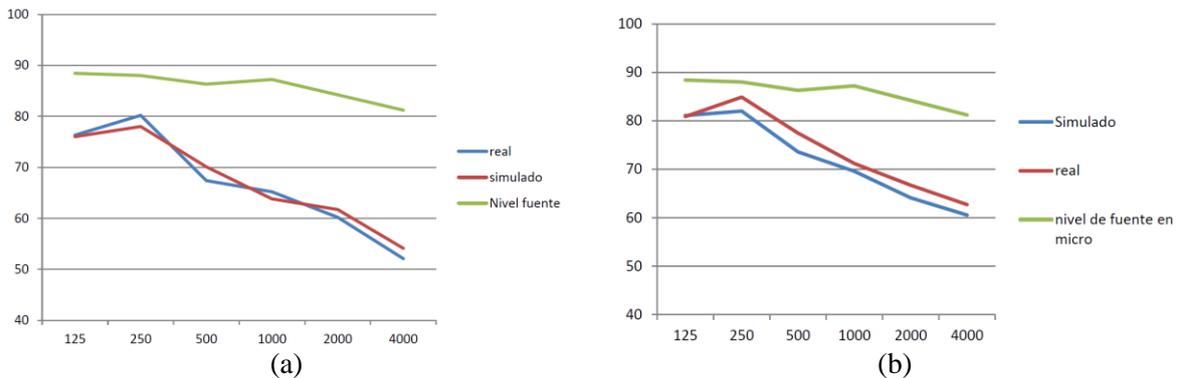


Figura 7 – Resultados por octavas del experimento 1: comparación entre resultados obtenidos en la herramienta y resultados reales de campo. (a). Resultados del experimento 2 (b).

3.5 Experimentos

Al objeto de validar los resultados que proporciona esta herramienta se procedió al desarrollo de dos experimentos en un entorno controlado. Para ello se instaló un pequeño sistema de refuerzo sonoro en un espacio disponible y perfectamente conocido, que a la vez fue introducido en la herramienta.

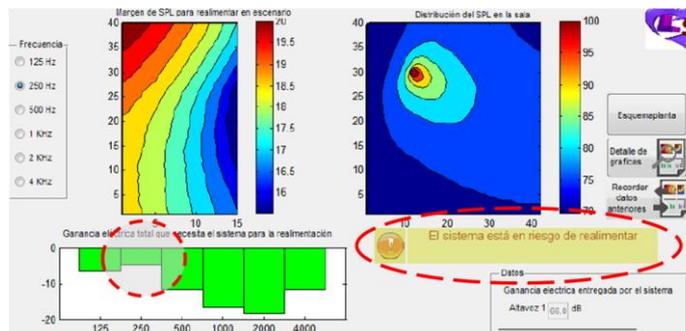


Figura 8 – Interfaz de usuario del entorno de simulación, sección de resultados. Vista de un resultado con riesgo de realimentación, correspondiente al experimento de Figura 7.b.



Sobre el sistema real se comprobó si en las localizaciones informadas por la herramienta se corroboran los datos. Para ello seleccionamos varias posiciones con distintas ganancias eléctricas del sistema, representándose los niveles en función de la frecuencia, reales y simulados, y el nivel de fuente como evidencias de la condición de realimentación. Los resultados pueden observarse en Figura 6.b , Figura 7 y Figura 8. En la Figura 7.a y Figura 7.b podemos observar como los resultados de la simulación obtenidos en la herramienta y las medidas reales difieren en menos de 3 dB para el caso peor, diferencia achacable a múltiples factores, fundamentalmente a simplificaciones como no contemplar absolutamente todos los objetos presentes en el recinto y la falta de precisión en los valores reales de las absorciones de los materiales. En las condiciones observadas en la herramienta esta indicaba no realimentación (Figura 6.b y Figura 7.a), podemos observar que los márgenes son superiores a 8 dB en el peor de los casos. En la Figura 7.b se presentan los resultados obtenidos en un segundo experimento donde se incrementa la ganancia eléctrica del preamplificador, en este caso el sistema real es claramente inestable y en los resultados de la herramienta se indica exactamente lo mismo (Figura 8). También es posible comprobar que los márgenes de variación de los niveles real y simulado siguen estando por debajo de los 3 dB.

4 Conclusiones

El entorno de simulación creado es altamente interactivo y no lineal (en la caracterización del sistema y en la navegación por la interfaz). Permite acceder a cualquier etapa del proceso para cambiar sistemas o modificar parámetros, características, etc., desde cualquiera de las fases sin que sea necesario repetir todo el proceso.

Los experimentos realizados comparando resultados reales de campo con los simulados muestran que las diferencias son inferiores a 3 dB lo que nos permite decir que la herramienta creada, con el propósito para el que ha sido creada, cumple con las necesidades y concuerda con lo esperado en cuanto a precisión, perfectamente asumible para el trabajo con instrumentos de sonometría del tipo 2.

Al haberse desarrollado el código de la aplicación en el entorno MATLAB, bastante extendido entre los ingenieros en general y en la ingeniería de telecomunicación en particular, es asequible el seguimiento del código para introducir mejoras o corregir cualquier desajuste, lo que posibilita el crecimiento de la aplicación en facilidades y precisión en los resultados.

Como herramienta aplicada en la docencia permite el entrenamiento de los estudiantes con antelación al acceso a los sistemas reales, lo que no solo permitirá un mejor aprovechamiento de la experiencia real sino que además esta se realice con una mayor seguridad para los equipos y dispositivos a emplear.

Referencias

- [1] Ahnert, W.; Steffen, F.; *Sound Reinforcement. Engineering Fundamentals and Practice*, Spon 2000, London EFN, 1999.
- [2] Bispo, B.; Rodrigues, P.; Freitas, D.; Acoustic feedback cancellation based on cepstral analysis. *Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), 2013*, Poznan, 2013, pp. 205-209.
- [3] Davis, D.; Patronis, E.; *Sound System Engineering*. Taylor & Francis, 2014.
- [4] Leishman, T.W. ; Jensen, Z.R.; A closer look at the Hopkins-Stryker equation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 135, 2014, pp 2237-2237.

- [5] Sakuma, T.; Sakamoto, S.; Otsuru, T.; *Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics. Methods and Applications of Wave-Based Computation*. Springer, Japan, 2014.
- [6] Schroeder, M. R.; Improvement of Acoustic-Feedback Stability by Frequency Shifting. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 36, 1964, pp 1718-1724.
- [7] Waterhouse, R.V.; Theory of Howlback in Reverberant Rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 37 (No. 5), 1965, pp 921-923.
- [8] Waterschoot, T.; Moonen, M. Fifty Years of Acoustic Feedback Control: State of the Art and Future Challenges. *Proceedings of the IEEE*, Vol 99 (No. 2), February 2011, pp 288-327.