
XIII Congreso Argentino de Acústica
VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas
Buenos Aires, 29 y 30 de octubre de 2015

AdAA2015-A002

Extensión del criterio de Bonello

Indio Gauvron ^(a)

(a) Técnico independiente, CABA, Argentina. E-mail: in_dio_ar@yahoo.com.ar

Abstract

Resonance modes in small spaces hold special importance when designing a room in which objective listening is intended; such is the case of a broadcast studio, a recording or a mastering facility. The optimization of spaces based on their proportions has been refined over the years ever since Bolt's Criterion through different methods. Among these, an optimization or an extension of Bonello's Criterion is proposed. Given the defined principles on which such criterion is based, altogether with its simplified algorithm of calculation, a variant that will select those relations that are strong and those that are weak through a software application of simple implementation has been developed. In this way, a new spectrum of possibilities is discovered as further auxiliary options for the calculation of a space's proportions. Results are displayed in a table based on a quantitative categorization of all the relevant parameters for further application.

Resumen

Los modos de resonancia en pequeños recintos revisten vital importancia en el diseño de aquellos lugares donde se pretende una escucha objetiva del sonido, por ejemplo: estudios de grabación, radio, mastering, etc. La optimización de recintos, en base a sus proporciones, por diferentes métodos ha sido gradualmente refinada a lo largo del tiempo desde el criterio de Bolt.

Dentro de los variados métodos existentes se propone una optimización o extensión del criterio de Bonello. Dados los concretos principios en el cual se basa, además de un simplificado algoritmo de cálculo, se desarrolló una variante que selecciona aquellas relaciones sólidas y débiles mediante un software de simple implementación. De esta manera se abre una nueva paleta de posibilidades como auxiliar para el cálculo de las proporciones de un recinto. Los resultados se muestran en forma de tabla con una categorización cuantitativa de los parámetros relevantes para su posterior aplicación.

1 Introducción

Desde la aparición de “Theory of sound”, obra mayúscula de William Strutt, donde se desarrolla la ecuación que calcula las frecuencias de los modos de resonancia normales de un recinto regular (fórmula 1), han surgido diversas formas de predecir el comportamiento modal de dichos espacios. Entre ellas podemos mencionar como uno de los precursores a Richard Bolt (Bolt, 1946), además de Gilford (Gilford, 1979), Louden (Louden, 1971), Walker (Walker, 1996), Cox (Cox et al., 2000) y, por supuesto, Bonello (Bonello, 1981).

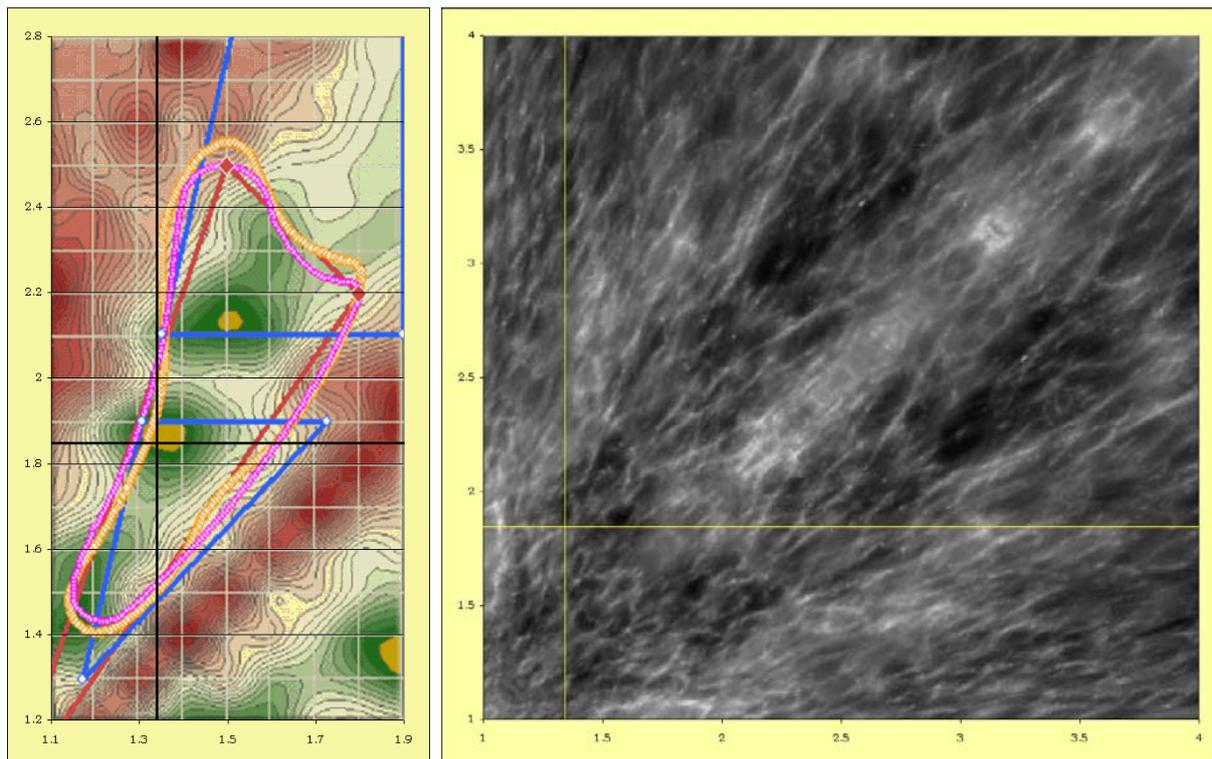


Figura 1. Representación gráfica para la corroboración con las proporciones de los criterios de Bolt, Louden, Walker, EBU R22 (1998) y Cox.

El comportamiento resonante a bajas frecuencias en recintos de moderadas dimensiones, como es el caso de los controles de estudio de grabación, estudios de radio, controles de sonido para televisión, salas de postproducción, etc., es de vital importancia debido a su escaso volumen y, por consiguiente, excesiva coloración por los aportes del mismo recinto.

A partir del uso de varios de los criterios mencionados para el diseño de estos espacios, surgieron, en su oportunidad, algunas anomalías que dieron como resultado la aplicación de una metodología que extiende u optimiza la distribución de las frecuencias de los modos de resonancia normales. El presente trabajo pretende mostrar dicha metodología y exponer algunos resultados hallados.

1.1 Limitación y alcance del criterio

La mayoría de los criterios basan su funcionamiento en determinar la distribución más adecuada de los modos de resonancia en recintos regulares. Simples comparaciones mediante gráficos que cotejan las relaciones entre largo, ancho y alto y verifican la “calidad” de dichas proporciones. Algunas con mayor especificidad otras con menos tienen en común la rapidez y simpleza de su aplicación.

Desde otra mirada, pero, manteniendo como objetivo una distribución modal lo más homogénea posible, surge otro criterio que asienta su trabajo en determinar la función representada por la cantidad de modos normales por tercio de octava¹. Conociendo los precisos principios en el cual se basa el criterio de Bonello (Bonello, 1981), además de un sintético algoritmo de cálculo, su uso siempre formó parte de mis cálculos en el diseño de estudios de grabación; sumado a varios de los otros criterios.

En cierta oportunidad, usando diferentes programas de cálculo (propios), encuentro una anomalía en los resultados buscados. Para exactamente el mismo recinto uno de los resultados indicaba que se cumplía con el criterio de Bonello y el otro no.² Esta simple diferencia surgía por una minúscula limitación en la forma de obtener las frecuencias de los modos normales para luego contabilizarlos por tercio de octava. La responsable de esta pequeña diferencia resultó ser la velocidad de sonido.

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{X}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{Z}\right)^2} \quad (1)$$

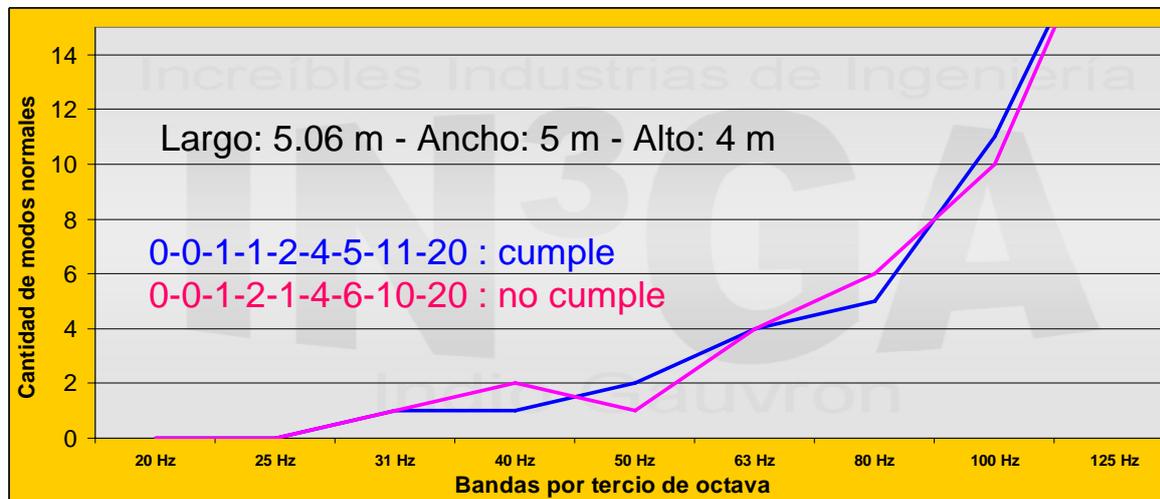


Figura 2. Representación gráfica del criterio de Bonello para el mismo recinto, pero, tomando como base del cálculo 344 m/s (trazo color azul) y 342 m/s (trazo color magenta).

- 1 Además de la cantidad de modos normales por tercio de octava, se establece que la función debe ser monótona o monótona creciente, con limitaciones a las cantidades en dicho tercio. Con respecto a las coincidencias, también hay un tratamiento específico. Ver (Bonello, 1981).
- 2 Aclaro que estaba usando dos programas de cálculo diferentes por motivos ajenos al presente trabajo y eso resultó en el beneficio de haber hallado una nueva forma de búsqueda.

2 Una pista veloz

La velocidad de propagación del sonido en el aire es función directa de la temperatura ambiente. Dicha variación es concreta y cambia de forma categórica al variar la temperatura.

$$c = c_0 + 0,6 \cdot t \quad (2)$$

En la fórmula 2 se puede ver la incidencia directa debido a la temperatura (t) ambiente en grados Celsius a partir de la velocidad a 0 °C ($c_0 = 331.3$ m/s).

La humedad relativa ambiente no aporta un gran cambio, al menos en el contexto diario de un estudio de grabación, y, salvo situaciones muy específicas, se puede omitir en el cálculo (ver figura 3). Se puede apreciar a partir de los trabajos realizados por Owen Cramer y otros autores su escasa influencia, dentro del rango de temperaturas en un estudio (Cramer, 1993; Schaik et al., 2010).

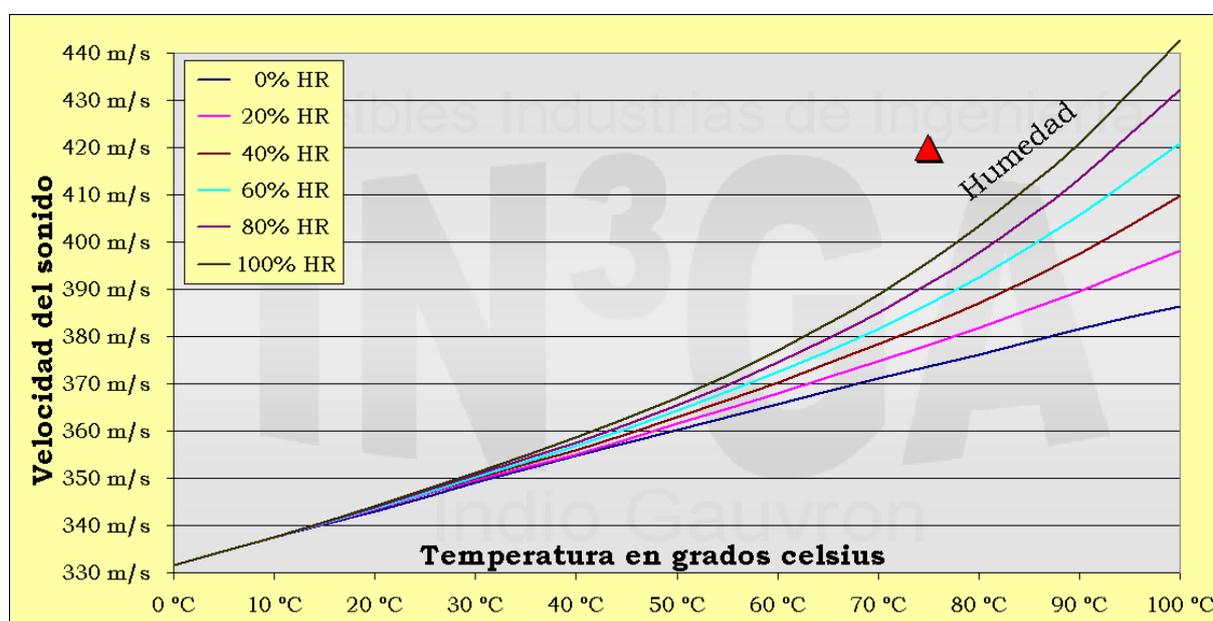


Figura 3. Representación gráfica de la relación entre velocidad de propagación del sonido en el aire con la temperatura y humedad relativa ambiente.

Por otro lado la presión atmosférica produce cambios menos significativos que la humedad por la forma en que se compensa con la densidad del medio. La ecuación de Newton-Laplace para la velocidad del sonido en un gas ideal nos lo muestra.

$$c = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}, \quad (3)$$

donde γ es el índice adiabático, también conocido como el factor de expansión isoentrópica. Es la relación entre los calores específicos de un gas a presión constante y un gas a volumen constante (C_p / C_v), y surge debido a que una onda de sonido clásico provoca una compresión adiabática, en la que el calor de la compresión no tiene tiempo suficiente para escapar del pulso de presión, y por lo tanto, contribuye a la presión inducida por la compresión (Rowlinson et al., 1982; Hirschfelder et al., 1964; Dean, 1979); p es la presión y ρ la densidad.

3 Nueva forma de búsqueda

A partir de todas estas condiciones de contorno el paso siguiente fue la elaboración de un algoritmo que fuera cambiando la temperatura ambiente, en un rango de valores especificados, y con ello realizar la verificación del criterio de Bonello con un contador de coincidencias en su cumplimiento.

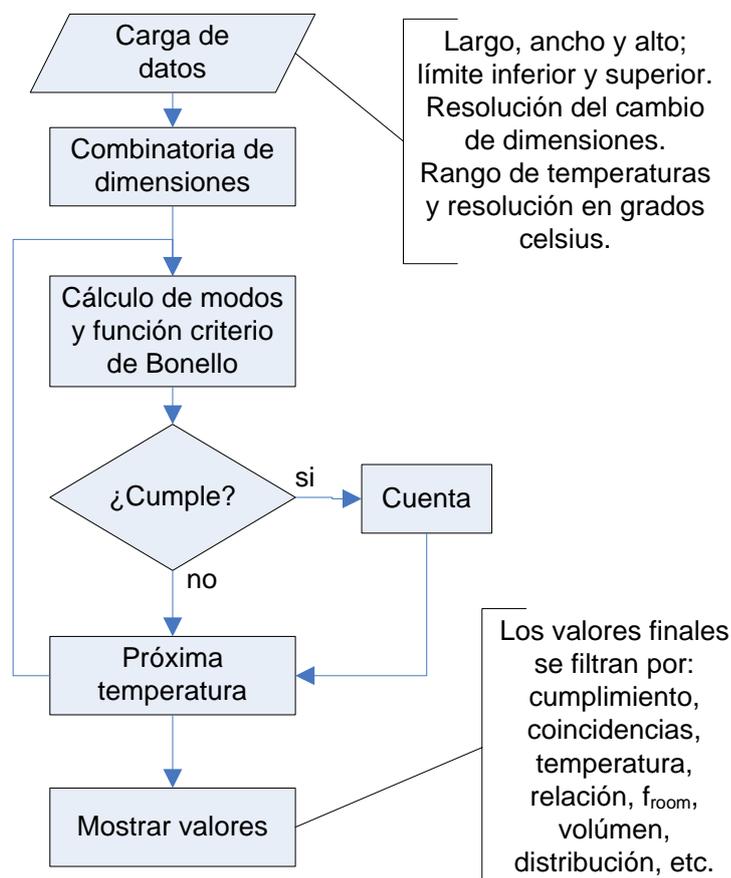


Figura 4. Diagrama de flujo del programa que realiza la búsqueda con los criterios basados en las variaciones de la velocidad de propagación del sonido como consecuencia de un rango de temperaturas elegido.

De esta manera se pueden seleccionar, con muchos tipos de filtros adecuados a cada circunstancia, aquellas relaciones “sólidas y débiles”. Para establecer un orden de “solidez” basado en la cantidad de cumplimientos del criterio de Bonello para una misma proporción y a diferentes temperaturas. Otra característica a contemplar es que, además de las variaciones de temperatura, se puede realizar una búsqueda para un gran número de combinaciones posibles de dimensiones o proporciones.

Una reciente incorporación permite utilizar un listado elaborado por otros programas (que se importa), ya sea por selección de otros criterios, combinaciones especiales, etc. Y ejecutar el mismo procedimiento para verificar o cuantificar las relaciones “sólidas y débiles”.

Los datos de entrada se establecieron, por simplicidad en la ejecución y organización, de la siguiente manera.



44.1 s Lapso
ciclos totales 53361

OK

Dimensiones		
	Máximas	Mínimas
Largo	5.100 m	5.000 m
Ancho	4.520 m	4.200 m
Alto	4.000 m	3.800 m
RT60		0.5 s
Resolución de cambio		1.0 cm
Velocidad del sonido		344.0 m/s
Rango de temp superior		25.0 °C
Rango de temp inferior		19.0 °C
Resolución de cambio		1.0 °C

Calcular

Sacar: "No cumple"

Ver minigráficos

Barrido de temperatura

Contar coincidencias

Sacar "Múltiplos"

Elementos totales calculados	53361	Cantidad de 1 coincidencias	577
No cumplen con el criterio	42993	Cantidad de 2 coincidencias	536
Si cumplen con el criterio	10368	Cantidad de 3 coincidencias	486
Número máximo de coincidencias	7	Cantidad de 4 coincidencias	134
Número mínimo de coincidencias	0	Cantidad de 5 coincidencias	441
Posibilidades de coincidencia	7	Cantidad de 6 coincidencias	380
Cantidad de combinaciones con máx	320	Cantidad de 7 coincidencias	320
Cantidad de Múltiplos	0	Cantidad de 8 coincidencias	0
Cantidad de No múltiplos	53361	Cantidad de 9 coincidencias	0
		Cantidad de 0 coincidencias	4749

Figura 5. Muestra de la sección para la entrada de datos y ajustes, selección de filtros primarios y exposición del resumen de resultados.

El resultado se puede obtener en forma de tabla ordenada con los parámetros de: largo, ancho, alto, f_{room} , volumen, distribución modal, temperatura, coincidencias, proporción, etc.; para filtrar con las condiciones que uno decida utilizar como base de consulta.

Largo	Ancho	Alto	Volumen	froom	Bonello	Densidad modal	Temp.	coincid	Multiplicidad	Proporc.
5.08 m	4.28 m	3.80 m	82.621 m³	155.6 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-16-14-0-0-0-0-0-0	20 °C	5	No múltiplo	1.34 :: 1.13 :: 1
5.08 m	4.28 m	3.80 m	82.621 m³	155.6 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-15-15-0-0-0-0-0-0	21 °C	5	No múltiplo	1.34 :: 1.13 :: 1
5.08 m	4.28 m	3.80 m	82.621 m³	155.6 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-14-16-0-0-0-0-0-0	22 °C	5	No múltiplo	1.34 :: 1.13 :: 1
5.08 m	4.28 m	3.80 m	82.621 m³	155.6 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-14-16-0-0-0-0-0-0	23 °C	5	No múltiplo	1.34 :: 1.13 :: 1
5.08 m	4.28 m	3.80 m	82.621 m³	155.6 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	24 °C	5	No múltiplo	1.34 :: 1.13 :: 1
5.08 m	4.28 m	3.80 m	82.621 m³	155.6 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-16-0-0-0-0-0-0	25 °C	5	No múltiplo	1.34 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.28 m	3.80 m	82.458 m³	155.7 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-16-14-0-0-0-0-0-0	19 °C	3	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.28 m	3.80 m	82.458 m³	155.7 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-15-15-0-0-0-0-0-0	20 °C	3	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.28 m	3.80 m	82.458 m³	155.7 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-15-15-0-0-0-0-0-0	21 °C	3	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.28 m	3.80 m	82.458 m³	155.7 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	22 °C	3	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.28 m	3.80 m	82.458 m³	155.7 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	23 °C	3	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.28 m	3.80 m	82.458 m³	155.7 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	24 °C	3	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.28 m	3.80 m	82.458 m³	155.7 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	25 °C	3	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.28 m	3.80 m	82.296 m³	155.9 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-16-14-0-0-0-0-0-0	19 °C	2	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.28 m	3.80 m	82.296 m³	155.9 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-15-15-0-0-0-0-0-0	20 °C	2	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.28 m	3.80 m	82.296 m³	155.9 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-14-16-0-0-0-0-0-0	21 °C	2	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.28 m	3.80 m	82.296 m³	155.9 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	22 °C	2	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.28 m	3.80 m	82.296 m³	155.9 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	23 °C	2	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.28 m	3.80 m	82.296 m³	155.9 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	24 °C	2	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.28 m	3.80 m	82.296 m³	155.9 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	25 °C	2	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.05 m	4.28 m	3.80 m	82.133 m³	156.0 Hz	Cumple	0-0-1-1-2-3-4-10-15-15-0-0-0-0-0-0	19 °C	1	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.05 m	4.28 m	3.80 m	82.133 m³	156.0 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-14-16-0-0-0-0-0-0	20 °C	1	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.05 m	4.28 m	3.80 m	82.133 m³	156.0 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-14-16-0-0-0-0-0-0	21 °C	1	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.05 m	4.28 m	3.80 m	82.133 m³	156.0 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	22 °C	1	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.05 m	4.28 m	3.80 m	82.133 m³	156.0 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-2-5-10-13-17-0-0-0-0-0-0	23 °C	1	No múltiplo	1.33 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.52 m	4.00 m	91.666 m³	147.7 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-3-5-9-20-9-0-0-0-0-0-0	23 °C	0	No múltiplo	1.27 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.52 m	4.00 m	91.666 m³	147.7 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-3-5-9-20-8-0-0-0-0-0-0	24 °C	0	No múltiplo	1.27 :: 1.13 :: 1
5.07 m	4.52 m	4.00 m	91.666 m³	147.7 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-3-5-9-20-8-0-0-0-0-0-0	25 °C	0	No múltiplo	1.27 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.52 m	4.00 m	91.485 m³	147.9 Hz	NO cumple	0-0-1-1-2-4-4-9-21-9-0-0-0-0-0-0	19 °C	0	No múltiplo	1.26 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.52 m	4.00 m	91.485 m³	147.9 Hz	NO cumple	0-0-1-1-2-4-4-9-21-9-0-0-0-0-0-0	20 °C	0	No múltiplo	1.26 :: 1.13 :: 1
5.06 m	4.52 m	4.00 m	91.485 m³	147.9 Hz	NO cumple	0-0-0-2-2-3-5-9-20-10-0-0-0-0-0-0	21 °C	0	No múltiplo	1.26 :: 1.13 :: 1

Figura 6. Muestra de la tabla de resultados encolumnados para filtrar a conveniencia.

3.1 Verificaciones iniciales

Para un estudio posterior se obtuvo un “mapa de solidez” en función de las proporciones, similares a los diagramas elaborados por Richard Bolt, M. Louden y Trevor Cox, alcanzando una semejanza de patrones, a los mencionados.

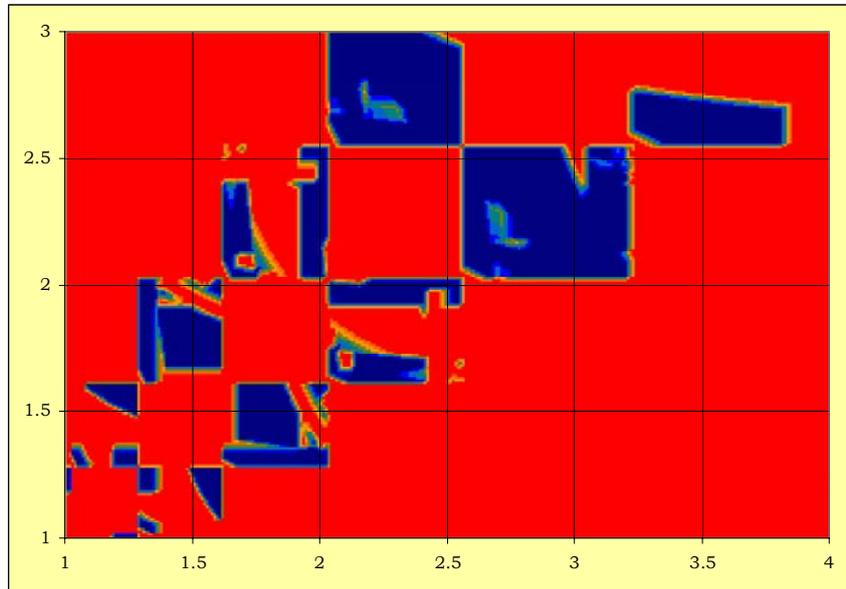


Figura 7. Diagrama de “solidez” expuesto en función de las proporciones de recintos regulares. Las zonas más sólidas son de color azul, variando hacia las más débiles de color rojo.

Otra prueba se hizo con gráficos de distribución de energía relativa a los modos normales. Las diferencias de dicha distribución son notables con respecto al valor del coeficiente de correlación de la regresión lineal de la misma función obtenida.

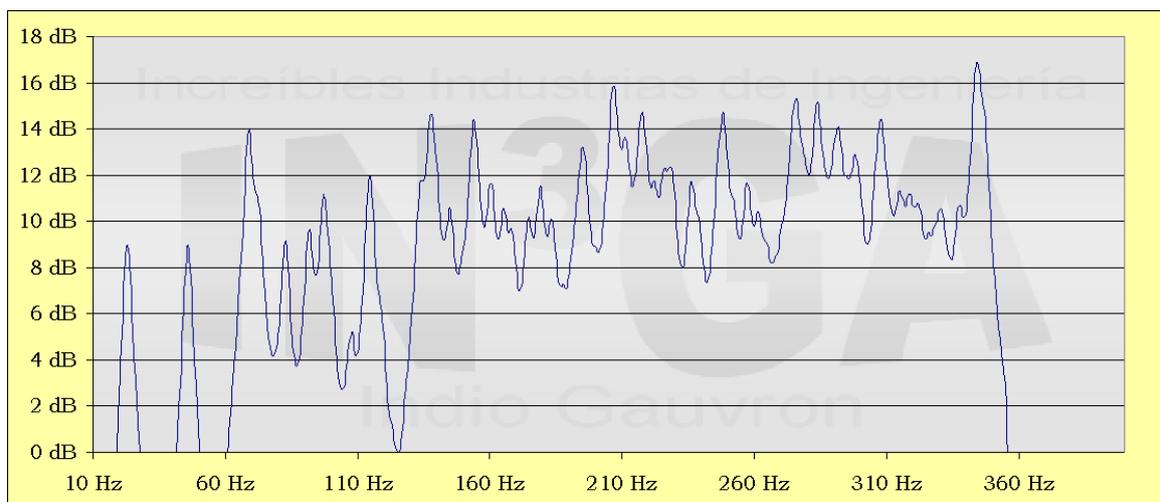


Figura 8. Distribución de la energía de los modos de resonancia para una proporción débil a modo de ejemplo de una gran cantidad de muestras.

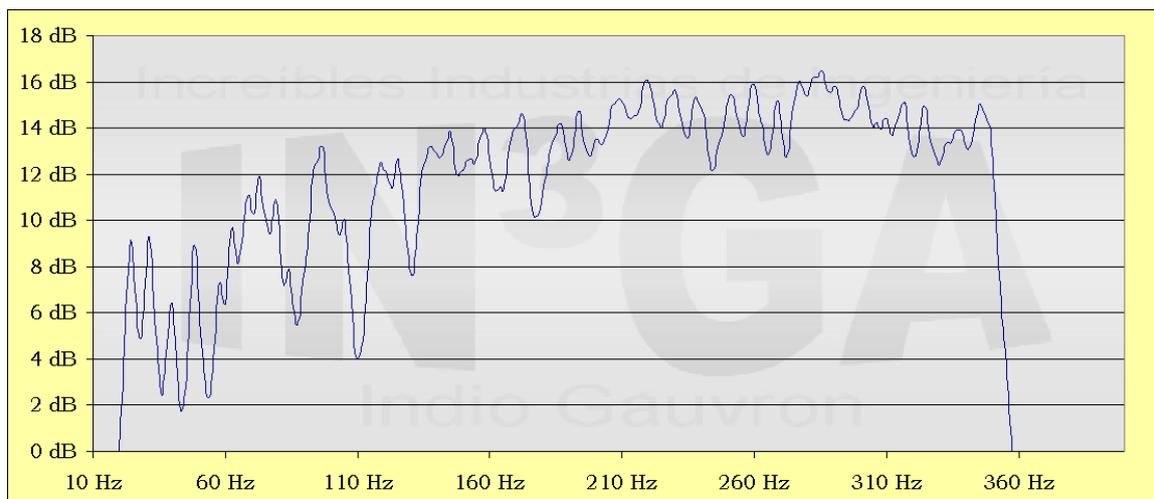


Figura 9. Distribución de la energía de los modos de resonancia para una proporción sólida a modo de ejemplo de una gran cantidad de muestras.

Ajeno a todo el análisis teórico, que siempre está vigente y no caduca, se probó el algoritmo en el diseño de diferentes proyectos de estudios del país y del extranjero, con resultados altamente satisfactorios; en el dominio de las mediciones y la escucha objetiva y subjetiva.

4 Conclusiones

El programa de búsqueda de modos está en funciones desde hace un par de años y sigue creciendo en prestaciones con las necesidades que se van presentando en el cálculo y diseño de estudios de grabación. La mayor parte de las mejoras se basan en la optimización de los algoritmos planteados, especialmente para grandes cantidades de relaciones. Algunos de estos avances se centraron en la velocidad de resolución, ya que el mismo está implementado en lenguaje tipo script³.

Referencias

- Bolt, R.H. (1946). Note on the normal frequency statistics in rectangular rooms. *J.Acoust.Soc.Am.* 18(1) 130-133.
- Bonello, O. (1981). A new criterion for the distribution of normal room modes. *J.Audio.Eng.Soc.* 29. 597-606.
- Cox, Trevor; D'Antonio, Peter (2000). Determining Optimum Room Dimensions for Critical Listening Environments: A New Methodology. *Proc 110th Convention AES.* paper 5353
- Cramer, Owen (1993). The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration. *Journal of the Acoustical Society of America* (93), 2510-2516.
- Dean, E. A. (1979). Atmospheric Effects on the Speed of Sound, Technical report of Defense Technical Information Center, 1-14.

³ Todo el programa está hecho en Visual Basic de Aplicaciones (VBA) que viene incorporado en Microsoft Excel 2003. La planilla de cálculo sólo se utiliza para la entrada y salida de datos; o postproceso de alguno de ellos, todo el cálculo está hecho en VBA.

- Gilford, C.L.S. (1979). The acoustic design of talk studios and listening rooms. *J.Audio.Eng.Soc.* 27. 17-31.
- Hirschfelder; Curtis; Bird (1964). *Molecular Theory of Gases and Liquids*, Wiley, New York, capítulos 5 y 11.
- Louden, M. (1971). Dimension ratios of rectangular rooms with good distribution of eigentones. *Acustica.* 24. 101-104
- Rowlinson; Swinton (1982). *Liquid and Liquid Mixtures*, Butterworths, London , 3rd. . 16-17.
- Schaik, Wilhelm; Grooten, Mart; Wernaart, Twan; Geld, Cees (2010). High Accuracy Acoustic Relative Humidity Measurement in Duct Flow with Air. *Sensors*, 10, 7421-7433.
- Walker, R. (1996). Optimum Dimension Ratios for Small Rooms. Preprint 4191. 100th Convention of the AES.