



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A065

Diseño de una cámara anecoica con aplicación para trabajo acústico

Ricardo Alonso Quintana Soler ^(a),
Rafael Alexander García Luque ^(a),
Luis Jorge Herrera Fernández ^(a).

(a) Programa Ingeniería de Sonido, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá D.C., Colombia. Cr. 8H # 172 -20.

Abstract

An anechoic chamber is an enclosure that satisfies sound behavior condition of free field. Therefore, it needs a special absorption treatment and in the same way it must guarantee a suitable isolation from noise and vibrations. This paper presents an anechoic chamber designed with 63Hz as low cut frequency, based on the established for the standard ISO-3745, references of some anechoic chambers constructed worldwide and criteria of acoustic design for enclosures. The paper includes the acoustic conditioning, the simulation of the sound field inside the room by two different methods (Wang ASA-1988, and Cunefare ASA-2006), and the construction and measurement of the scale model for sound absorption of the design. Finally, it's determined the sound absorption of 96% for the room in the range from 63 Hz to 16 kHz; the simulation done shows that in the designed enclosure the sound field is clearly Homogeneous and with small values of the deviation of SPL regarding to the inverse square law; and the comparative between the measurements done to the model and at outdoors have high correspondence.

Resumen

Una cámara anecoica es un recinto que satisface la condición de comportamiento sonoro del campo libre, por tanto requiere un tratamiento absorbente especial y asimismo debe garantizar un adecuado aislamiento a ruido y vibraciones. En este trabajo se presenta el diseño de una cámara anecoica con frecuencia de corte inferior a 63Hz, basado en lo establecido por la norma ISO-3745, referencias de algunas cámaras anecoicas construidas a nivel mundial y criterios de diseño acústico para recintos. La propuesta comprende el acondicionamiento acústico, la simulación del comportamiento del campo sonoro dentro de la sala mediante dos métodos diferentes (Wang ASA-1988, y Cunefare ASA-2006), y la construcción y medición del modelo a escala para absorción sonora del diseño. Finalmente se determina para la sala planteada una absorción sonora promedio del 96% en el rango de 63 Hz hasta 16 kHz; la simulación realizada muestra que el campo sonoro en el recinto diseñado resulta claramente homogéneo y con pequeños valores de desviación del SPL respecto de la ley del inverso cuadrado; y la comparativa de las mediciones realizadas en el modelo y al aire libre tienen alta correspondencia.

1 Introducción

La cámara anecoica es una sala dedicada a la metrología acústica, caracterizada por satisfacer la condición de comportamiento sonoro del campo libre y evitar que factores externos afecten las mediciones. Desde los diseños de Bedel 1936 para Laboratorios Bell, y Beranek y Spleeper 1946 para la Universidad de Harvard quienes fueron pioneros en este tema, distintos laboratorios y facultades de ingeniería como: McIntosh, ISVR, la NASA, La UNAM, el instituto NMIJ, entre otros, empezaron a interesarse por el fenómeno anecoico hasta desarrollar y construir sus propios proyectos. En este tipo de recinto se mide principalmente potencia, presión e intensidad sonora, también permiten la realización de pruebas psicoacústicas y la investigación en los campos de la ciencia y la ingeniería.

Para el diseño de la sala es importante considerar los siguientes aspectos: las dimensiones de la cámara y de la fuente a medir, el tipo de absorción sonora a utilizar, el comportamiento del campo acústico, la desviación del SPL respecto de la ley del inverso cuadrado en la cámara y el aislamiento a ruido y vibraciones, finalmente es preciso conjugar las especificaciones acústicas con los elementos arquitectónicos y constructivos.

2 Diseño de la Cámara Anecoica

La determinación de las especificaciones necesarias para el diseño resultan del complemento de las pautas y restricciones establecidas por la norma ISO 3745, la recopilación bibliográfica de criterios de diseño acústico y referencias de cámaras ya construidas y avaladas. Las dimensiones de la cámara a diseñar son largo (d) de 15,4 m; ancho (w) de 14,2 m y alto (h) de 8,2 m. De acuerdo con la norma ISO 3745 se recomienda que el volumen de la cámara (V_c) sea mínimo 200 veces mayor que el volumen de la fuente (V_f), por tanto V_f es como máximo $8,9 \text{ m}^3$. En este caso se trabaja con fuentes cuya mayor dimensión (a) es 1.8 m. Las frecuencias de corte geométrico para estas dimensiones se calculan a partir de “las ecuaciones (1) y (2)”¹ dando como resultado 43,4 Hz, 62,4 Hz y 53,6 Hz respectivamente para d , w y h .

$$a + 2a + \frac{\lambda}{4} + l_c = h \quad (1)$$

$$a + 4a + \frac{\lambda}{2} + 2l_c = w, d \quad (2)$$

Por tanto se diseña para una frecuencia de corte inferior (f_c) de 63 Hz desde la cual se validan las condiciones de campo, lo que no es problema porque las frecuencias geométricas son inferiores a esta.

2.1 Acondicionamiento acústico

2.1.1 Absorción Sonora

La cámara requiere un tratamiento absorbente especial para sus 6 superficies internas, consistente en cuñas de fibra de vidrio o lana mineral. Según Beranek y Sleeper 1946, de las diferentes estructuras de cuñas analizadas como la lineal, de capas, piramidal, exponencial y exponencial piramidal, la cuña lineal en fibra de vidrio es la más efectiva para absorción

¹ Blanco M., Herráez M (1993). Calificación de la cámara semi-anecoica del laboratorio de acústica y vibraciones de la ETS de Valladolid. SEA-TecniAcustica. pp. 167-170.

sonora y posee un costo menor de fabricación; adicionalmente proponen un nomograma que calcular las longitudes de la cuña en función de la f_c . Para garantizar una adecuada absorción sonora se decide optar por una estructura híbrida con una densidad de $17,6 \text{ Kg/m}^3$ en la base, y 48 Kg/m^3 para la punta, cuña que según el trabajo de Koidan 1972 presenta mayor estabilidad en el coeficiente de absorción sonora (α) para el rango de frecuencias de trabajo, en la figura 1 se muestra la cuña elegida. Se calcula que 8126 cuñas son necesarias para la sala.

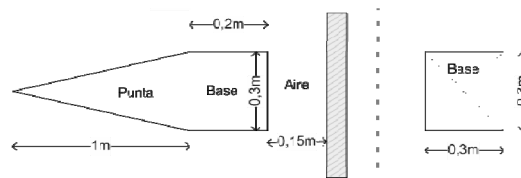


Figura 1. Cuña escogida.

2.1.2 Aislamiento a Ruido y vibraciones

El aislamiento a ruido de la cámara se diseña con base en una curva NC15 respecto de un “espectro sonoro de tráfico urbano medido en la ciudad de Bogotá”², ya que es un nivel de ruido considerado como alto, por tanto garantiza un adecuado cálculo de TL , para un recinto metrológico que debe cumplir la condición de ser muy silencioso. Por lo anterior se determina que las paredes se componen de un muro doble de mampostería estructural, una cavidad de aire de 7,5 cm y un tabique compuesto por dos láminas de fibrocemento externas y un relleno fibra de vidrio de 7 lb/ft^3 . Para la puerta de acceso se propone una lámina de acero del espesor del muro doble e interiormente se mantiene la cavidad y el tabique compuesto anteriormente nombrado. Finalmente en la cubierta se emplea el sistema Steeldeck compuesto por una lámina de acero de 29 cm y una losa de concreto de 10 cm, adicionalmente se propone un cielo raso que consiste en el mismo tabique compuesto por fibrocemento y fibra de vidrio. Para aislamiento a vibraciones la norma ISO 3745 tampoco establece un criterio definido, por eso se recurrió a referencias de cámaras existentes, las cuales llevan a proponer un tratamiento antivibratorio a frecuencias naturales de 4 ó 5 Hz que combina almohadillas de neopreno y resortes según sea el caso. En la figura 2 se muestran la planta y el corte del diseño propuesto.

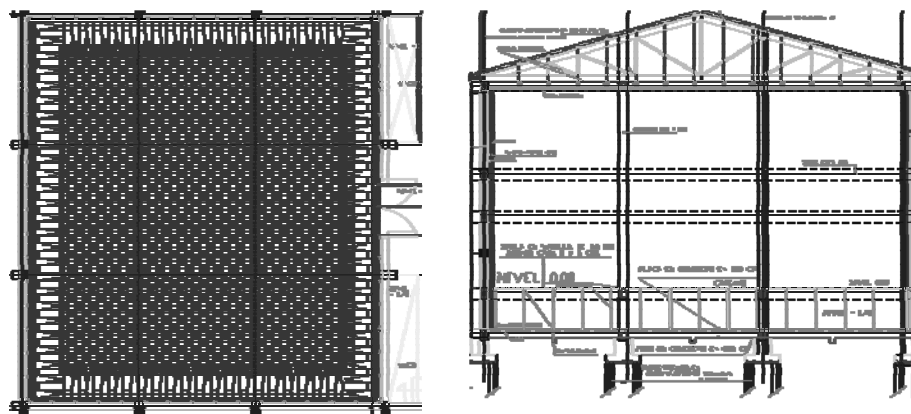


Figura 2. Cámara diseñada.

² García R., Ibarra D., Souza E., Olarte J., Cáceres O. 2006. Análisis de control de calidad sonora: Restaurante vegetariano Naturalmente. Trabajo práctico Universidad de San Buenaventura-Ingeniería de Sonido. pp.1-10.

2.2 Simulación del campo sonoro dentro de la cámara propuesta

Se realiza con el fin de conocer la desviación del SPL respecto de la ley del inverso cuadrado (ΔL), comparar esta con lo establecido por la norma ISO 3745 y adicionalmente conocer la homogeneidad del campo sonoro dentro de la sala. Considerando que el recinto es altamente absorbente las ecuaciones utilizadas habitualmente como las de Olson, Sun y Duda no son apropiadas, por tanto es necesario basarse en otros criterios como la teoría Fuente-Imagen (Wang-Cai 1988) y el método basado en Función de Transferencia para un ancho de banda determinado (Cunefare-Badertscher-Wittstock 2006). El Software utilizado fue Matlab R2007a de Mathworks6 y se simuló para los dos métodos citados. Para graficar la ΔL simulada se tienen en cuenta las dimensiones de la cámara diseñada y los coeficientes de absorción de las cuñas escogidas, donde todos los puntos receptores del plano están separados cada 5 cm formando una grilla, se toman 3 intervalos de valores, el color blanco se encuentra entre 0 dB y 1 dB, el color es azul entre 1 dB hasta 1,5 dB y si el color es rojo entonces el valor será mayor a 1,5 dB, valores acorde a la norma ISO 3745, es ideal que todos los puntos en la cámara anecoica tengan valores en el intervalo de color blanco, los puntos de color azul son aceptables y los puntos de color rojo son puntos en los cuales no se cumple la norma.

2.2.1 Método basado en la teoría Fuente-Imagen

Esta teoría resuelve la ecuación de onda incluyendo únicamente la presencia de las reflexiones de primer orden, es importante especificar las dimensiones y la forma del recinto, el coeficiente de absorción sonora y la frecuencia de corte inferior de la cuña utilizada. El método de cálculo para un tono puro emitido por la fuente sonora está basado en la teoría de rayos, se suma la energía aportada por el sonido directo y por cada reflexión de primer orden, las demás reflexiones son despreciadas ya que tienen un nivel muy bajo debido a la absorción del recinto, la ΔL para este método está dada por la ecuación (3).

$$\Delta L(dB) = 20 \log \frac{|p|}{P_m / r_0} \quad (3)$$

donde, P_m , es la amplitud de la presión sonora del sonido directo, r_0 , es la distancia de la fuente al receptor p , es la suma de las presiones de las reflexiones de primer orden y la señal directa. En la figura 3 se muestra el plano XY para las frecuencias de 40, 100, 125, 200, 250, 315 y 500 Hz y otra gráfica general para las demás frecuencias ya que el resultado es el mismo, se puede observar que el campo acústico es variable respecto a la posición del receptor, ya que hay valores que se encuentran de color rojo y muy cerca se encuentran valores de color blanco, sin pasar por el color azul. En frecuencias bajas se tiene el mayor inconveniente ya que en medias y altas, el coeficiente de absorción sonora llega a ser aproximadamente 0,99. Los problemas más graves se ven en la frecuencia de 40 Hz que a pesar de no estar en el rango de frecuencias de funcionamiento del diseño de la cámara anecoica se desea analizar ya que se pretende minimizar riesgos conociendo el comportamiento en frecuencias cercanas a la f_c (63 Hz).

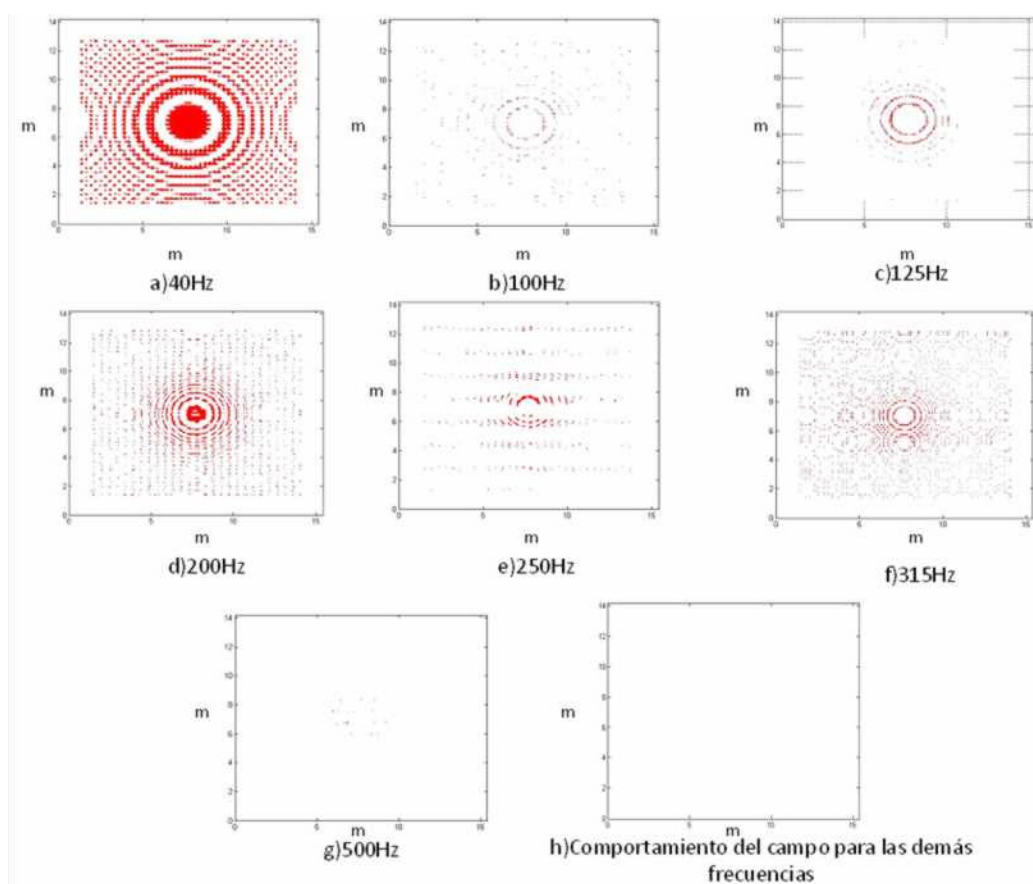


Figura 3. Simulación por teoría de rayos.

2.2.2 Método basado en la Función de Transferencia

Básicamente analiza la cámara anecoica como un sistema, en el cual la señal de entrada esta dada por la fuente sonora y la señal de salida es la que llega al receptor, este método utiliza no solo una señal seno, sino un ancho de banda determinado (como suele ser una medición real). También considera que el análisis de ΔL para campo libre mediante el método de Fuente-Imagen no es suficiente para calificar el recinto; la ΔL para este método está dada por la ecuación (4).

$$\Delta L(dB) \leq 10 \log \left(1 + \left(\frac{|R_{eq}|}{r_2/r_1} \right)^2 + 2 \frac{|R_{eq}|}{r_2/r_1} \left| \text{senc} \left(\frac{bk\Delta r}{2} \right) \right| \right), \quad (4)$$

donde, R_{eq} , es el coeficiente de reflexión a incidencia normal, r_1 , es la distancia de la fuente al receptor, r_2 , es la distancia recorrida por la primera reflexión, $bk\Delta r$, es un factor que determinara la fase entre las 2 señales (la de entrada y la de salida), b , es una constante de proporcionalidad para las bandas de frecuencia. En la figura 4 se observan que los valores de la ΔL para todas las posiciones en la frecuencia de 40 Hz está en el rango de frecuencias de color azul y en las frecuencias superiores el valor siempre está en el rango de color blanco, lo que significa, a diferencia del método basado en teoría de rayos, que el recinto va a tener un

comportamiento de campo acústico muy estable y la desviación mantiene el mismo valor en cualquier punto de la grilla.

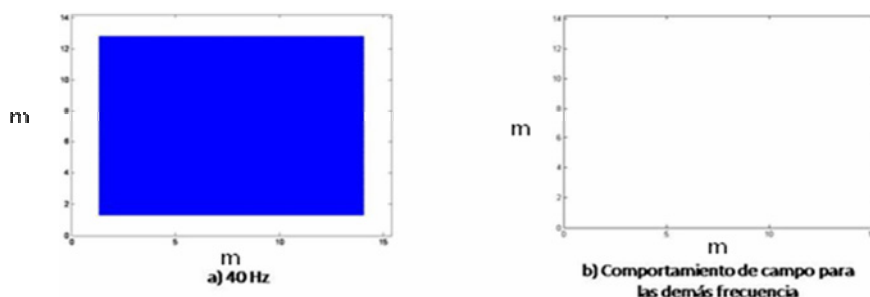


Figura 4. Simulación por el método por basado en función de transferencia.

Adicionalmente para ambos métodos simulados se obtuvo un comportamiento del campo sonoro con las mismas características para los planos XZ y YZ.

2.3 Modelo a escala para absorción sonora de la cámara anecoica diseñada

El modelo realizado tiene por objeto conocer una aproximación al comportamiento sonoro que se tendría con la cámara anecoica diseñada (recinto real); se utiliza una escala 1:10, porque ofrece mayor confiabilidad para las mediciones y comodidad para trabajar el escalamiento de frecuencias. Conociendo que las mayores complicaciones para lograr las condiciones de campo libre dentro de un recinto se da en bajas frecuencias, se determina que el modelo debe mostrar su eficiencia por lo menos hasta $4fc$, ya que en frecuencias superiores se tiende a absorber con mayor facilidad; por tanto el rango de frecuencias escaladas escogido fue de 630 Hz a 4 kHz. El escalamiento de fuente y micrófono tuvo en cuenta garantizar el rango de frecuencias de trabajo, como fuente sonora se utilizó un hexaedro escalado de 11 cm de lado, los receptores fueron el sonómetro Svantek 943A y el micrófono ECM8000. Para el escalamiento de absorción sonora se midió acorde a la ISO 10534-2 en un tubo onda plana estacionaria con un rango de trabajo de 630 Hz a 2,5 kHz, la muestra escogida para absorción del modelo es espuma de dos densidades diferentes, el montaje elegido consta de dos cuñas de 26 Kg/m^3 y otras dos de 18 Kg/m^3 , la longitud de la punta de las cuñas es de 10 cm, la de la base es 5 cm y la cavidad de aire es de 2 cm. Finalmente se concluye que se satisface la condición de altos coeficientes de absorción sonora, el α_{prom} de las bandas medidas es 0,95. En la figura 5a) se comparan los α escalado línea punteada y de la cuña real (línea continua).

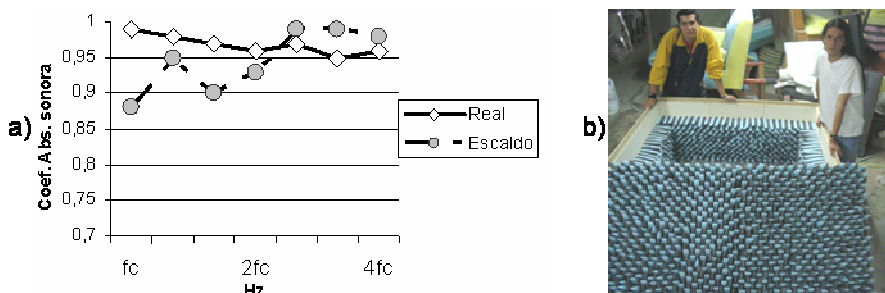


Figura 5. Coeficiente de absorción de cuña real y de escalada (Izq.), Modelo a escala para absorción sonora construido (Der.).

Se evidencia que la cuña escalada no se desempeña totalmente como la real, pese a esto se considera que por tratarse de un modelo a escala se consiguen valores suficientemente altos para las frecuencias de interés. Los valores de los coeficientes de absorción sonora reales corresponden a los tercios de octava de 63 Hz a 250 Hz, sin embargo para efectos comparativos se disponen junto a los de las cuñas escaladas (de 630 Hz a 2,5 kHz). Definido el escalamiento se construyó el modelo a escala, ver figura 5b), que consta de aproximadamente de 4072 cuñas, para la estructura del modelo (muros) se utilizó MDF (de 12 mm espesor), la cámara de aire de 2 cm (escalamiento de absorción reactiva) se hizo con cartón paja y como piso flotante (malla) se empleó angeo metálico.

2.3.1 Comparación entre el SPL medido en un recinto real y el SPL medido en su modelo a escala.

Según Beranek 1969, la teoría establece que al generarse sonido con una fuente con potencia sonora determinada, el SPL medido a una distancia x dentro de un recinto, será igual al SPL medido dentro del modelo a escala de este recinto a una distancia x/n (donde n es el factor de escalamiento), si el sonido es generado por una fuente escalada (espectro sonoro escalado) para el rango de frecuencias de interés con una potencia sonora igual a la potencia de la fuente real.

Para soportar esta teoría se decide demostrar su validez teórica, basándose en lo expuesto a continuación. En escalamiento se establece que la respuesta al impulso de un recinto es muy similar a la de su modelo, el nivel de las reflexiones para ambas va a ser el mismo, la diferencia radica en el tiempo de llegada de cada reflexión, para el modelo va a ser n veces menor que en el recinto real. En la figura 6a) (Izquierda) se observa esta comparación, la respuesta al impulso del modelo (color verde) y la del recinto en color azul. La respuesta al impulso empleada para este caso, es la capturada en el modelo a escala de la cámara diseñada, aplicando un desescalamiento para la auralización del recinto. Acorde a lo anterior, si se interpretan el recinto y su modelo como sistemas LTI y se cuenta con las respuestas al impulso de estos, mediante la operación convolución se llega a la auralización. Utilizando el pulso rectangular $u(t)-u(t+3)$ como señal de entrada las señales de salida de los sistemas presentarán fluctuaciones respecto a la señal original que dependerán de la respuesta al impulso de cada uno de ellos, luego viene un intervalo de estabilidad (tiempo en el que nivel es igual tanto en el recinto como en el modelo), y finalmente se presenta un decaimiento debido a la terminación de la señal de entrada. Este comportamiento se muestra en la Figura 6b) (derecha), donde la señal de salida del recinto real se muestra en color verde y la del modelo escalado en color azul.

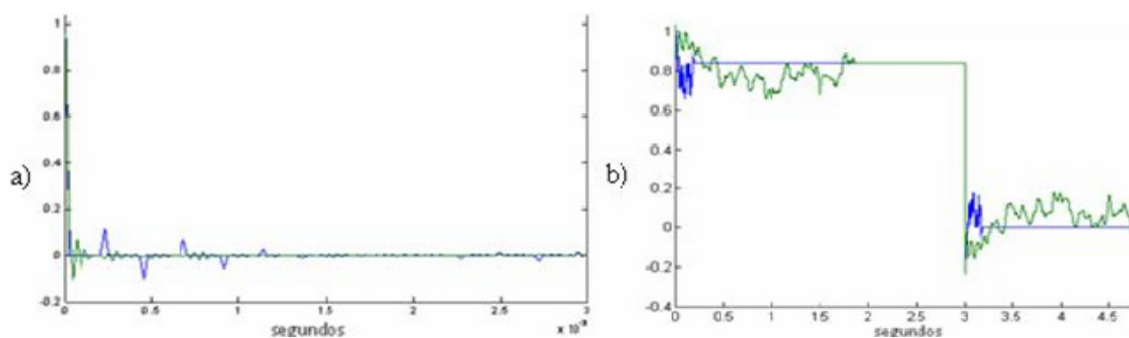


Figura 6. Respuestas al impulso y auralización del recinto y el modelo.

Acorde a esta interpretación teórica, si la medición de la ley del inverso cuadrado se realiza en el modelo a escala para absorción sonora en el intervalo de tiempo donde la señal es estable, se garantiza que el SPL medido si no es el mismo que en el recinto real, tendrá un valor muy aproximado; por tanto al medir en ese instante de tiempo y determinando un decrecimiento de SPL al duplicar la distancia, dentro del modelo, este mismo se presentará en la realidad.

2.3.2 Medición en el modelo y al Aire libre

Se realizan mediciones al aire libre y en el modelo del diseño con fines comparativos.

Ley del inverso cuadrado.

Se determinaron 2 trayectos de mediciones, el primero duplicando las distancias a partir de una posición a 10 cm de la fuente y el segundo a partir de 12,5 cm, por tanto las posiciones de receptor (r) escogidas para ubicar el sonómetro fueron 10, 12,5, 20, 25, 40, 50, 80 y 100 cm. Es preciso aclarar que a partir de 31 cm (dos veces la mayor dimensión de la fuente) se encuentra el campo libre, sin embargo debido a las dimensiones del modelo se toman distancias menores.

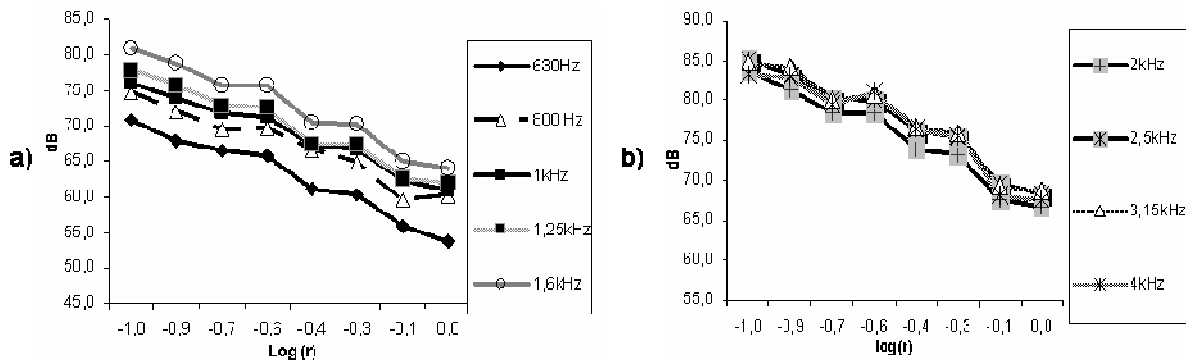


Figura 7. Medición de la ley del inverso cuadrado al aire libre.

En la figura 7, se observa el comportamiento de la energía en función de la distancia (r), para el rango de frecuencias escalado. De acuerdo con los coeficientes de regresión lineal calculados se obtuvo un buen ajuste de los datos y el valor aproximado de las pendientes es efectivamente menos dos (-2), pero realmente fluctúa entre -2.2 y -2.5. Por otra parte acorde a la norma ISO 3745 es indispensable analizar la ΔL , en la figura 8 se observan estos resultados.

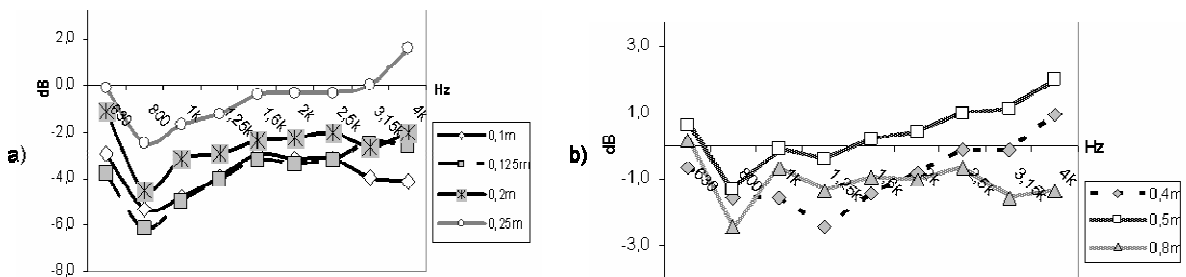


Figura 8. ΔL calculada al aire libre.

Para las distancias de 10 cm, 12,5 cm y 20 cm la desviación es mayor debido que estas posiciones de receptor se encuentran en campo cercano (campo de tipo reactivo). Para las demás distancias las mayores ΔL no superan los 3 dB para ningún tercio de octava. Por tanto se puede determinar para este caso que no se logra satisfacer plenamente lo descrito por la norma ISO 3745.

Para la medición en el modelo se tienen en cuenta las distancias ya mencionadas y se garantiza una buena relación S/R; la figura 9 muestra el SPL medido en el modelo en función de la distancia, las pendientes para las frecuencias de 630, 800, 1000, 1250 y 2500 Hz se encuentran entre -2.6 y -2.8, para 3.15 kHz y 4 kHz este decrecimiento es mucho mayor, ya que las pendientes son de -3.6 y -3.8 respectivamente; para 1,6 kHz y 2 kHz los valores de las pendientes son -2.2 y -2.1, que corresponden a los mejores obtenidos. Al comparar estos resultados con los obtenidos al aire libre, es claro que en el modelo se tienen pendientes de mayor valor para la mayoría de bandas. La desviación que se presenta en el modelo como se observa en la figura 10, muestra que al igual que en la medición al aire libre, existe menor desviación en las distancias de 40 cm, 50 cm y 80 cm, y no se superan los 4 dB para ninguna banda. También se concluye que las mayores desviaciones negativas, se dan en las bandas de tercio de octava en las cuales el α medido de las cuñas escaladas tiene los valores más altos (1600, 2000 y 2500 Hz).

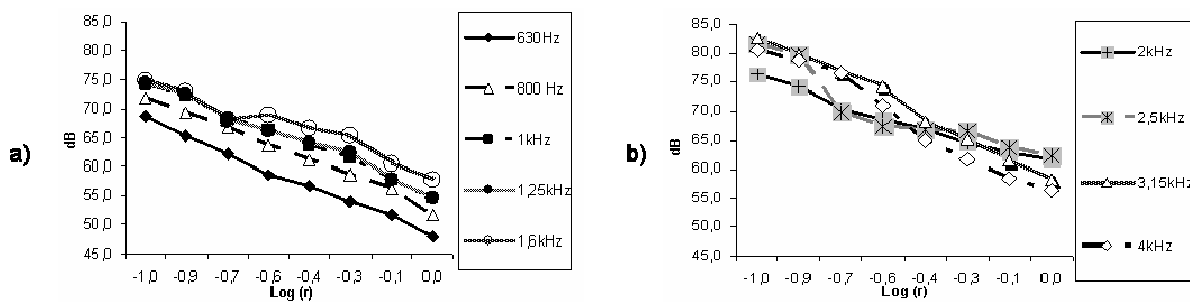


Figura 9. Medición de la ley del inverso cuadrado en el modelo.

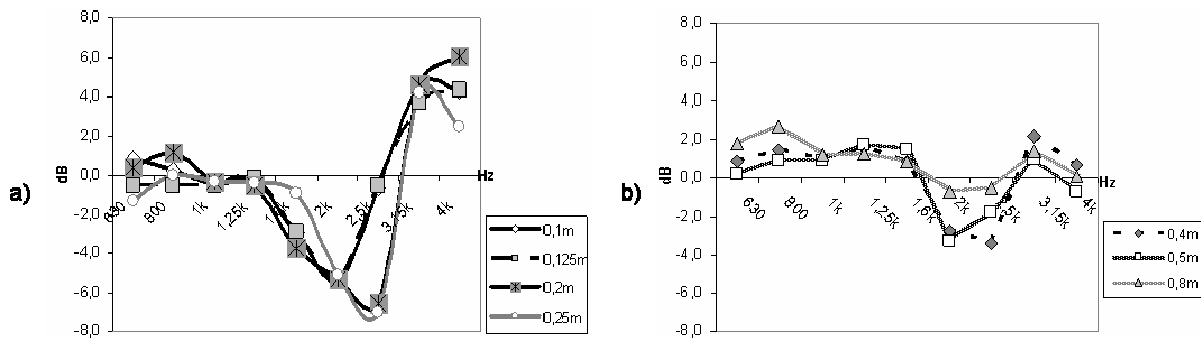


Figura 10. ΔL calculada en el modelo a escala para absorción sonora.

Auralización

Contando con las respuestas al impulso tanto del aire como del modelo se decide realizar una auralización de cada una de estas con ruido rosa mediante la operación convolución en el Software Matlab de Mathworks v.6. En la figura 11 se muestra el dominio espectral normalizado de las auralizaciones, en la parte a) para el modelo donde se evidencia el refuerzo de ciertas frecuencias pero tiende a estabilizarse, mientras en la parte b) de la

figura se observa que la acentuación de algunas frecuencias es muchísimo mayor que en el modelo a escala, teniendo amplitudes del orden de 10^4 .

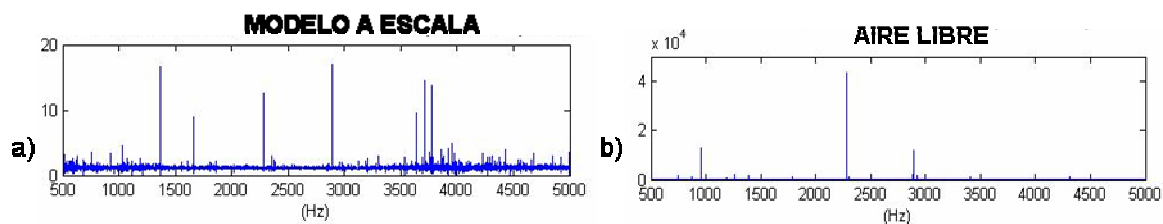


Figura 11. Auralizaciones del modelo y del aire libre.

3 Conclusiones

De acuerdo al análisis realizado la aplicación de la norma ISO 3745 es insuficiente para la calificación de cámaras anecoicas, ya que no establece criterios acústicos puntuales, esta apreciación concuerda con lo manifestado por Cunefare 2003 y Lord 2003.

Utilizar un sistema de absorción mixto con cuñas híbridas garantiza una absorción sonora muy estable y lo suficientemente alta para lograr la condición anecoica.

Las simulaciones del campo sonoro dentro de la cámara diseñada por los dos métodos utilizados muestran que el comportamiento de éste es homogéneo para el rango de frecuencias de trabajo.

Los resultados de la ΔL calculada del SPL medido dentro del modelo no supera los 4 dB, y pese que no cumple lo establecido por la norma ISO 3745 se aproxima a lo obtenido en la medición efectuada al aire libre, cuya ΔL máxima es de 3 dB.

El modelo a escala 1:10 tiene un comportamiento de campo sonoro correspondiente al de una cámara anecoica con frecuencia de corte inferior de 630 Hz, ya que se obtiene gran similitud con lo medido y calculado al aire libre, y en algunos resultados muestra un mejor desempeño.

Referencias

- Bedell E. (1936). Some Data on a Room Designed for Free Field Measurements. JASA , Vol.8, Issue 2, pp. 118-125.
- Beranek Leo; Slepper H. (1946). The Design and Construction of Anechoic Sound Chambers. JASA, Vol.18, Issue 1, pp. 140-150.
- Beranek, Leo L (1969). Acoustical Modeling as a Tool in Problem Solving. JAES, Vol.17 Number 2 pp. 151-155.
- Cunefare Kenneth, Biesel Van (2003). Anechoic chamber qualification: Traverse method, inverse square law analysis method, and nature of test signal. JASA, Vol.113, Issue 2, pp. 881-892.
- Cunefare Kenneth (2006). On the qualification of anechoic chambers. JASA, Vol.120, No. 2, pp. 820–829.
- García Rafael A., Quintana Ricardo A. (2007). Diseño de una cámara anecoica con aplicación para trabajo acústico. Proyecto de grado Univesidad de San Buenaventura - Ingeniería de Sonido.
- ISO 3745. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semi-anechoicas.
- ISO 10534, Acústica. Determinación del coeficiente de absorción sonora y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2 Método de función de transferencia.
- Koidan Walter (1972). Wedge Design for Anechoic NBS anechoic Chamber. JASA. Vol.52, Issue 4A, pp. 1071-1076.

- Lord Richard (2003). Qualification of free-field rooms . The need For a standard. National Physical Laboratory -Technical paper. pp. 1-7.
- Wang Ji-qing, Cai Biao (1989). Calculation of free-field deviation in an anechoic room. JASA, Vol.85, Issue 3. pp.1206-1212.