

Factores fundamentales en la atenuación de impulsos acústicos producidos por explosivos de baja potencia

A. Moreno, C. de la Colina, F. Simón
Instituto de Acústica, C.S.I.C., Madrid

Introducción

Es frecuente el uso de pequeñas cargas explosivas como aproximaciones a la fuente acústica ideal para generar impulsos acústicos de corta duración y amplio espectro [1]. De manera indiscriminada estos impulsos se usan en la medición del aislamiento y absorción acústicas de elementos de edificación [2, 3], y de barreras anti ruido [4], y en la determinación de la respuesta impulsiva de recintos [5]. También se han usado en el estudio de la influencia del suelo y de las condiciones atmosféricas en la propagación exterior [6].

Hemos observado caracteres alineales en la propagación de tales impulsos que podrían influir falseando la determinación de las magnitudes citadas si se usan modelos lineales. Concretamente hemos señalado con anterioridad que sucede esto en cuantía no despreciable en aspectos de simple propagación, en el caso de barreras acústicas [7]. Podría también influir en los procesos específicos de absorción y aislamiento provocando reacciones del material fuera del rango lineal, efecto que hemos observado en resonadores del tipo de Helmholtz. En este estudio se da cuenta de los resultados experimentales de atenuación en el aire al propagarse en atmósfera tranquila, donde se han minimizado los efectos de gradientes de temperatura y viento en el espacio de propagación.

Bases teóricas de la atenuación en el aire en el rango lineal de amplitudes

Se admite dentro del rango lineal que la atenuación de ondas planas en

campo libre sigue la expresión

$$I = I_0 e^{-mx} \quad (1)$$

donde I_0 es la intensidad acústica en el punto inicial, x es la distancia recorrida y m el coeficiente de atenuación energética para una onda monocromática. En las tablas numéricas se emplea con preferencia el coeficiente α que corresponde a la atenuación en decibelios por metro y resulta ser la suma de cuatro coeficientes:

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vibO} + \alpha_{vibN} \quad (2)$$

siendo α_{cl} la absorción clásica (efectos de viscosidad, conducción calorífica, radiación y difusión), α_{rot} la absorción molecular debida a la relajación térmica rotacional, α_{vibO} la absorción debida a la relajación de vibración del oxígeno y α_{vibN} la de relajación del nitrógeno. Se han obtenido fórmulas para cada una de estas contribuciones [8], que sustituidas proporcionan la expresión general siguiente:

$$\alpha = 8.686f^2 [F1(pf,pf,T) + F2(T,f,fO) + F3(T,f,fN)] \quad (3)$$

en donde $F1$, $F2$ y $F3$ son funciones polinómicas sencillas de las variables indicadas, p_s es la presión atmosférica ambiental, p_{s0} la presión atmosférica de referencia, T la temperatura Kelvin, f la frecuencia y fO y fN las frecuencias de relajación del oxígeno y del nitrógeno respectivamente, que son función a su vez de p_s , p_{s0} , T y de la fracción molar h de la humedad relativa.

Para valores dados de la presión atmosférica, la temperatura y la frecuencia, al hacer variar h se observa un cre-

cimiento progresivo hasta un cierto valor máximo, a partir del cual disminuye de nuevo. Para cada frecuencia se obtiene una curva diferente tal como se indica en la *Figura 1* para la temperatura de 20°C.

Para valores fijos de p_s , T y h el coeficiente de atenuación es una función creciente con la frecuencia, de pendiente muy débil en un pequeño intervalo y según f^2 fuera de él. En términos generales esto quiere decir que las componentes de una señal se atenúan tanto más cuanto mayor sea su frecuencia, por lo que al propagarse la señal se irá convirtiendo en una señal de baja frecuencia.

Método experimental y resultados

Los resultados experimentales manejados en este artículo corresponden a cartuchos de 0,5 gramos con formas cilíndricas cercanas a 20 mm de longitud y 10 mm de diámetro.

La medida de estas señales acústicas impulsivas, con una problemática específica debida principalmente, al corto intervalo de tiempo en que tienen lugar (<2ms), a su gran dinámica (> 140 dB) y a su amplio espectro en frecuencia (hasta 20 KHz), se resolvió mediante una instrumentación de altas prestaciones. Se usaron micrófonos de condensador de campo difuso de 1/4", con una fuente de alimentación a baterías. Antes y después de las tomas de señal se comprobó la cadena de recepción (micrófonos, preamplificadores, cables y conectores) mediante un pistófono de gran precisión (± 0.2 dB). Las señales resultantes se captaron, almacenaron y estudiaron en un analizador de formas

de onda, tetra canal, de tecnología digital, con una frecuencia de muestreo, máxima, de 1 MHz, y un convertidor analógico-digital de 16 bits.

El procesado realizado garantizó resoluciones en frecuencia satisfactorias, que variaron entre 2.77 Hz y 12.2 Hz según que se tratase respectivamente del impulso captado con el micrófono móvil (distancias variables entre 1m y 125 m) o con el micrófono de referencia (fijo a 10 m en todos los casos), ambos situados a una altura de 5 m sobre el suelo. Las señales del micrófono de referencia se usaron para igualar las intensidades de los sucesivos impulsos a uno de referencia.

La experimentación se llevó a cabo en un recinto de 90m x 180m x 15m, que mediante una ventana temporal adecuada permite una buena simulación de propagación en espacio abierto pero con la ventaja de garantizar un menor ruido de fondo, una minimización de corrientes de aire ($v < 0.1$ m/s) y de gradientes de temperatura. Durante las experiencias se observó la constancia de la temperatura y de la humedad relativa, 14° C y 56 %, respectivamente.

En la Figura 2 se muestran dos impulsos, uno captado a 1m y el otro a 80 m. Se observan los efectos de la atenuación en la propagación del impulso. Mientras que la duración total casi no ha cambiado al aumentar la distancia, el impulso ha disminuido mucho su amplitud y ha redondeado sensiblemente la forma abrupta del principio.

Atenuación del valor pico con la distancia recorrida

En un estudio anterior [9] se analizó la atenuación del valor pico. Con las series de valores pico de la presión p_i y de la distancia de captación r_i , se construyó una función lupa de expresión $lg(p_i/r_i)$ con la cual se amplifican las dispersiones respecto a la ley $1/r$ propia de la propagación esférica lineal de fuentes puntuales. Con su uso se demostró que el proceso de propagación no puede ser lineal no disipativo y que admite una buena aproximación si se considera un proceso no disipativo pero con una alinealidad $1/(r_i^{1.24})$. En los procesos alineales no disipativos se ha

obtenido teóricamente el valor 3 para el exponente en los procesos autosimilares de enorme energía (caso de la bomba atómica por ejemplo) [10]. Por otra parte y a efectos prácticos, dentro de un amplio intervalo de amplitudes, se admite para el valor pico en función de la distancia, la expresión :

$$p = 0.1567 \lambda^3 + 0.119 \lambda^2 + 0.269 \lambda^{-1} - 0.919 \quad (\text{en atmósferas}) \quad (4)$$

siendo λ la distancia, en unidades del radio de choque o longitud dinámica ($\lambda_0 = E/P_0$, E es la energía del impulso y P_0 es la presión atmosférica de equilibrio). El penúltimo término corresponde a la atenuación de ondas lineales por simple divergencia esférica. (Nótese que 150dB corresponden a una sobre presión de 0.00624 atmósferas).

También se demostró, en nuestro trabajo anterior ya citado [9], que admitiendo un proceso de propagación disipativo y lineal el coeficiente de absorción en el aire debe ser decreciente con la distancia según una función hiperbólica. Esta relación puede cumplirse si el coeficiente m es función del nivel (lo cual implica de alguna manera un cierto comportamiento alineal), o bien que al ser el impulso una señal de amplio espectro se atenúen mas fuertemente las componentes espectrales dominantes en cada momento que las restantes. De acuerdo con la teoría conocida del coeficiente de absorción en el aire sería un impulso que evoluciona siempre a un contenido cada vez mas rico en componentes de baja frecuencia. En este caso el valor de m a cada distancia considerada debe ser muy próximo al de las frecuencias dominantes en ese punto. Nuestro estudio anterior no pudo confirmar este aserto al obtener valores progresivos de m bien por encima de los se encuentran en la literatura a las frecuencias correspondientes, para las temperatura y humedad del aire medidas durante la experimentación.

Atenuación por bandas de frecuencia

Según la teoría lineal el coeficiente m debe ser sensiblemente constante

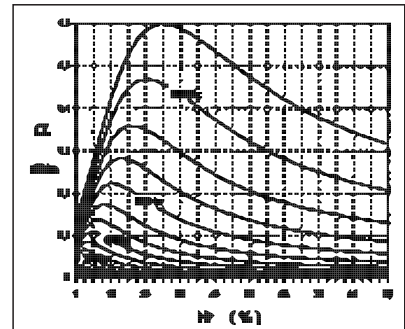


Figura 1. Absorción en el aire a 20° C.

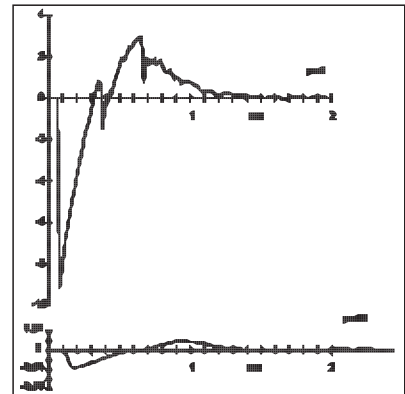


Figura 2. Impulsos captados a 1 m. y a 80 m. de la fuente.

dentro de una banda de frecuencia de tercio de octava, y tanto mas cuanto mas baja es la frecuencia central de la banda considerada. Es mas a bajas frecuencias (en torno a 100 Hz) el valor de m es tan pequeño que el proceso debe aparecer como casi no disipativo y muy probablemente poco influenciado por la alinealidad.

Retomemos la función lupa mencionada aplicada a una adaptación de la ecuación (1), para ondas esféricas, en donde asumimos que el proceso de la atenuación en el aire es lineal pero introducimos un parámetro γ de alinealidad como exponente de r :

$$lg(p.r) = \gamma \cdot lg(r_1) + (1 - \gamma) lg(r) - (0.5 lg(e)) m (r - r_1) = F1(\gamma) + F2(m) \quad (5)$$

en donde, por sencillez de escritura se denota por p el cociente p/p_{r_1} . La función F_1 , que tiene en cuenta los aspectos alineales de amplitud, es una recta en función de $lg(r)$ mientras que la función F_2 , que contabiliza la absorción lineal en el aire, es una recta en función de r .

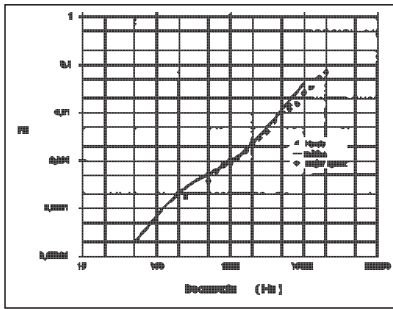


Figura 3.

Para las distintas bandas de frecuencia hemos calculado los valores experimentales $lg(p r)$. Hasta 400 Hz los puntos obtenidos se alinean siguiendo el eje OX lo que concuerda con el hecho de que los valores de m son extremadamente bajos en este intervalo de frecuencias y las energías son pequeñas y por tanto contribuyen poco al nivel fuera del rango lineal. Desde 500 Hz en adelante, los puntos describen formas progresivamente variables cuya aproximación no puede hacerse con F_1 , sino que requiere

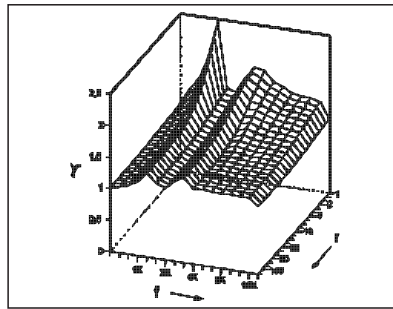


Figura 4.

F_1+F_2 es decir la fórmula (5) completa. Dando a m los valores más próximos posibles a los que otorga la fórmula (3), para obtener un buen ajuste, (adaptación a los puntos $lg(p r)$ cualitativa y cuantitativamente) ha bastado aproximar $(1-\gamma)$ por un polinomio del tipo $a + (b/(c+r)^2)$ en el que las constantes toman valores progresivamente variables. Los valores m de mejor aproximación aparecen en la Figura 3 comparados a los teóricos y a los experimentales de Harris [11]. Para γ se obtienen los valores repre-

sentados en la Figura 4, en donde todo indica que γ inicia con valores tanto mayores cuanto mayor es el contenido energético de la banda de frecuencia (1/3 octava) correspondiente (mayor alinealidad) y va disminuyendo al aumentar la distancia aproximándose progresivamente al valor 1 (fenómeno lineal).

Este nuevo modelo de propagación debe tenerse en cuenta en las exploraciones experimentales donde se empleen cartuchos de este tipo como fuentes de señales sonda a fin de obtener cuantificaciones adecuadas de los procesos en estudio

Agradecimientos

Parte de este trabajo se ha realizado dentro del Proyecto de Investigación AMB 95-0101, del Plan Nacional de I+D, DGICYT.

Agradecemos a la dirección de IFEMA las facilidades para usar el pabellón 8 del Recinto Ferial de Madrid

Referencias

- [1] C. de la Colina, Aproximación de la fuente acústica ideal mediante impulsos de explosiones y descargas de condensadores eléctricos a baja tensión. Tesis, Universidad A. de Madrid. 1995.
- [2] P. de Tricaud, Impulse technique for the simplification of insulation measurements between dwellings, Appl. Acoustics 8 (1975) 245-256.
- [3] J. Roland, Amélioration de la méthode de mesure rapide de l'isolement aux bruits aériens basée sur l'utilisation des bruits impulsifs, Ann. Institut. Techn. Bât. Travaux Pub. No. 380 (1980) 47-67.
- [4] NFS 31, Code d'essai pour la détermination de caractéristiques acoustiques d'écrans installés en champ libre. Afnor.
- [5] M. Barron, Impulse techniques for auditoria, Applied Acoustics 17 (1984) 175-181.
- [6] U. Radek, H. Klug, V. Mellert, Impulsive sound source of high intensity for outdoor sound propagation measurements, Proc. 13th I. C. A., vol 2, pp 23-26, 1989.
- [7] C. de la Colina, F. Simón, A. Moreno, Tecniacustica 96.
- [8] L. B. Evans, L. C. Sutherland, Absorption of sound in air, Wiley Lab. Report WR 70-14, 1970.
- [9] C. de la Colina, A. Moreno, F. Simón, J. Pfretzschner, Anales de Física, enviada;
- [10] L. J. Sedov, Similarity and dimensional methods in mechanics, Academy Press, New York 1959.
- [11] C. M. Harris, Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature, J. Acoust. Soc. Am. 40,1 (1966) 148-159.