

# MEDIDA DIRECTA DE INDICES GLOBALES DE AISLAMIENTO ACUSTICO MEDIANTE IMPULSOS PRODUCIDOS POR EXPLOSIONES

A. Moreno, J. Pfitzschner, C. Colina, J.M. Cundias\*,  
*Instituto de Acústica, C.S.I.C., Madrid.*

\* Centro Técnico de la Construcción y de los Materiales. Cuba

## Introducción

La medida del aislamiento acústico de un divisorio o entre recintos, mediante señales impulsivas ha recabado la atención de varios autores (1), (2), (3), como procedimiento alternativo al más común de señales permanentes y régimen estacionario, contemplado en la mayoría de las normas de media (UNE, ISO, ASA, DIN, etc.).

Si el impulso acústico de excitación fuera una función delta de Dirac, la respuesta del sistema (fundamentalmente el divisorio), sería directamente la respuesta impulsional. Esta, como es bien sabido, caracteriza completamente al sistema y permite obtener, de modo fácil, el aislamiento acústico. Es un procedimiento muy atractivo que ha polarizado la atención de investigadores en la búsqueda de fuentes de impulsos adecuadas.

Los requerimientos de corta duración y alto nivel necesarios para obtener energía suficiente en una amplia banda de frecuencia hicieron abandonar las altavoces alimentados por trenes de ondas de corta duración (1) en favor de pistolas detonadoras (2),(3) pequeñas cargas explosivas y descargas eléctricas de condensadores (4). Aunque estas explosiones poseen ciertas características favorables de duración y nivel, no son suficientes como para permitir obtener una adecuada aproximación de la respuesta impulsional del sistema. Esto obliga a analizar las señales en los recintos emisor y receptor para poder deducir el aislamiento. Este análisis ha sido realizado con éxito en el espacio frecuencial por Roland (5),

mediante técnicas de transformada rápida de Fourier (FFT). En las circunstancias actuales requiere una instrumentación compleja, limitada en la práctica a estudios en laboratorio. La aplicación a medidas in situ, para ser práctica, implica grabaciones en soporte magnético que posteriormente se analizan en laboratorio.

Ingemasson y de Tricaud proceden analizando los impulsos en el espacio temporal por técnicas analógicas, leyendo en un amperímetro el valor del aislamiento para cada banda de frecuencia. También en este caso se analizan en laboratorio las señales grabadas in situ para mayor eficacia y precisión.

El uso, ya generalizado en las reglamentaciones exigenciales, de valoraciones globales del aislamiento que caracterizan éste mediante un número único, ha suscitado la investigación de métodos experimentales ad hoc. El carácter práctico de estas magnitudes ha condicionado hacer estos métodos sencillos y rápidos, aplicables in situ, en operaciones de control de gran amplitud, y todo ello dentro de unos márgenes razonables de fiabilidad y precisión.

A priori, los impulsos acústicos producidos por explosiones parecen adecuados a este fin añadiendo además propiedades extraordinarias de portabilidad y fácil manejo.

En este artículo describiremos nuestras investigaciones sobre las características acústicas de impulsos producidos por explosiones de pequeñas cargas de pólvora, con vistas a su potencial uso en la medida del aislamiento acústico por métodos abreviados. Se presta especial interés a la repetitividad del espectro como factor condicionante de la incorporación en la cadena de medida de circuitos eléctricos de ponderación, ya que ello

*\*Durante la realización de este trabajo, en estancia de estudios en el Instituto de Acústica del C.S.I.C.*

permitiría la obtención directa de los valores globales del aislamiento acústico (6), tales como  $R_w$  (ISO 717) y/o  $R_A$  (NBE CA 82 del MOPU).

### Bases teóricas

Quizá la teoría más antigua acerca de los impulsos acústicos producidos por explosiones sea la de Weber (7), que él considera válida también para impulsos producidos por descargas eléctricas de condensadores. Dentro de su sencillez, contiene la explicación de propiedades importantes de este tipo de señales.

Según este autor, la onda acústica es producida por la dilatación térmica debida a la súbita cesión de energía al aire por la explosión. Postula que estas excitaciones están dentro del rango lineal y obtiene la solución mediante la ecuación lineal de ondas admitiendo que en el instante inicial,  $t=0$ , existe una sobrepresión  $p$  (presión acústica), sobre el valor de la presión estática, en una pequeña esfera de radio  $r$  durante un pequeño intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Encuentra así que las amplitudes de las componentes están dadas por la expresión.

$$A(\omega) = (1/\pi) \{ \omega^2 + (3c/r)^2 + (3c/\omega r)^2 \}^{-1/2}$$

con las fases:

$$\theta(\omega) = \tan^{-1} \{ \omega / [3c/r (1 + c/(\omega r)^2)]^{1/2} \}$$

siendo  $c$  la velocidad de propagación del sonido en el medio  $s$  la pulsación ( $=2\pi f$ ), y  $r$  el radio de la esfera inicial asociada a la energía calorífica cedida al medio.

La inspección de la fórmula de la amplitud  $A(\omega)$  indica que tiene dos asíntotas. Para frecuencias  $\omega \gg 3c/r$  se obtiene  $A_2(\omega) = 1/\pi\omega$  que es independiente de  $r$ , es decir, que a altas frecuencias todos los espectros tienden a coincidir con una recta única de pendiente  $-6$  dB/octava (**efecto Weber**). A frecuencias  $\omega \ll 3c/r$  se obtiene  $A_1(\omega) = (r^2/3\pi c^2)\omega$ , es decir que los espectros siguen rectas de pendiente  $+6$  dB/octava, desplazadas hacia niveles superiores al aumentar el radio de la esfera inicial asociada a la carga explosiva. Dichos desplazamientos son de  $+12$  dB al duplicarse el radio, o bien  $4$  dB al duplicarse la masa explosiva eficaz.

Se observa que el máximo se produce a una frecuencia tal que la longitud de onda es 3.6 veces el radio de la esfera asociada. Los máximos de amplitud se sitúan en una recta paralela a la asíntota  $A_2$ , de altas frecuencias, distanciada  $-7$  dB en una representación doble logarítmica por bandas

de frecuencia de ancho constante. En la figura 1 se muestra este comportamiento en unidades relativas.

En la figura 2 se presenta la amplitud y fase de una explosión, calculada por las fórmulas precedentes, con una esfera inicial asociada de radio 142 mm., lo que implica un máximo en 660 Hz, valores elegidos para que coincida con una de las explosiones reales obtenidas experimentalmente, que discutiremos más adelante.

A partir de estos datos, mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier, hemos obtenido la forma temporal del impulso correspondiente que puede verse en la figura 3 previa permutación circular de un número de posiciones suficientes para tener el impulso continuo y completo. Aunque la transformada de Fourier inversa produce un resultado con parte imaginaria nula, apoyando la verosimilitud de que corresponda a una situación real, se observan ciertas anomalías que señalaremos más adelante al compararlo con los resultados experimentales. (Weber no hace ninguna consideración sobre la forma temporal).

Los resultados precedentes contienen de forma implícita las principales leyes de similitud de los impulsos acústicos producidos por explosiones. El desarrollo completo de estas relaciones debe buscarse en obras relacionadas con las ondas de choque y explosiones (8), (9), (10). Desde el punto de vista que aquí nos interesa puede ser suficiente lo ya expuesto. Más adelante incidiremos en algunos otros aspectos puntuales. (Nota: el lector curioso puede obtener una cierta percepción subjetiva de las leyes de similitud de estos impulsos grabando en la velocidad más rápida de un magnetofono de cuatro velocidades en la relación 1:2:4:8 la descarga de un pequeño condensador. La reproducción sucesiva de cada una de las velocidades de mayor a menor produce la impresión de oír la descarga del condensador, un disparo de arma corta, un disparo de cañón y un trueno de una horrenda tormenta).

### Método experimental

La teoría expuesta en el párrafo anterior nos da base para mirar con optimismo la repetitividad de los impulsos acústicos producidos por explosivos de la misma naturaleza, misma masa y análoga manufactura. Estudiaremos cómo se traducen las variaciones de estas características físicoquímicas, habituales en el comercio, en las propiedades acústicas resultantes y la conveniencia o no de tomar precauciones especiales adicionales para garantizar límites razonables de tolerancia.

Por encargo nuestro, una empresa de pirotecnia preparó cuatro lotes de cincuenta petardos

de masas nominales 0.5, 2, 3 y 6 gr. De cada lote tomamos cinco petardos, al azar, para una primera serie de experiencias. A éstos añadimos 5 petardos de 1 gr. confeccionados por nosotros con el mismo material explosivo. Sobre los restantes pesamos tres de cada lote obteniendo los valores medios respectivos 0.5, 2, 3.2 y 6.1 gr. Todos los petardos eran de forma cilíndrica con longitudes entre 1.5 y 2 veces el diámetro.

Se hicieron explotar, por ignición rápida de una resistencia eléctrica colocada dentro del explosivo, en un recinto paralelepípedo de 100 m<sup>3</sup> cuya arista menor mide 3.3 m. La captación se realizó con un micrófono de condensador de 1/4" colocado a 4 m, un filtro analizador B&K, en respuesta lineal (2 -40000 Hz) y un instrumento digital especializado de captura y procesamiento de transitorios (data 6000 de Analogic Corp.). Los impulsos captados con dinámica de 72 dB se almacenaron en soporte magnético para su ulterior procesamiento.

Posteriormente se llevaron a cabo dos series de 6 explosiones cada una, a fin de estudiar la influencia en el impulso de la posición del punto de observación. Situamos éste a lo largo de dos líneas paralelas, una en la diagonal principal del recinto, a intervalos de 0.3 m sobre la horizontal, y la otra, con el mismo espaciado, 0.7 m. más alta. La distancia del punto de recepción a las paredes y suelo fue siempre mayor de 1 metros.

Dos series más se destinaron a estudiar el efecto de la absorción del recinto. Se usaron dos cámaras, una la citada de 100 m<sup>3</sup> y la otra de 50 m<sup>3</sup>.

Por estar interesados en este trabajo únicamente en el impulso generado por los explosivos, se extrajo éste de la señal completa que contiene múltiples reflexiones. En el procesamiento por técnicas de FFT, se completó con ceros hasta obtener una longitud que permitiera una adecuada discriminación en frecuencia: usualmente 2.77 Hz o 12.2 Hz. La frecuencia de muestreo se eligió en todos los casos de modo que se cubriera un rango de frecuencias superior a 10 KHz.

En el estudio de variabilidad del espectro, el procesamiento se hizo sobre cada impulso concreto. En la comparación de la teoría (principalmente la de Weber), por el contrario se promediaron los impulsos temporales dentro de cada grupo, obteniendo los espectros correspondientes a cada promedio.

En el estudio de la variación de la energía

acústica en función de la carga explosiva, se calculó aquélla integrando en el espacio temporal

$$\sum_{i=1}^N p^2(i) \Delta t$$

según el algoritmo:

en donde N es el número de puntos necesario para describir el impulso considerado y  $\Delta t$  el intervalo temporal de muestreo (normalmente 10 ó 44  $\mu$ s).

## Resultados y discusión

En la figura 4 aparece reproducida la forma temporal de un impulso típico producido por una explosión. Se observa primero una sobrepresión seguida de una depresión la cual tiende asintóticamente al valor de equilibrio. Es frecuente observar al final de la sobrepresión y hasta la mitad de la depresión nuevos incrementos de presión respecto al valor en el instante precedente que modifican la forma, supuestamente "lisa", del impulso y son debidos a explosiones retrasadas de parte del explosivo, es decir, que la explosión no es simultánea para toda la masa\*. También aparece un rizado distribuido por doquier en el impulso, en ningún modo atribuible al ruido de fondo. Ambos hechos producen lógicas desviaciones respecto a las previsiones teóricas, esta última sólo en la parte alta del espectro.

El promedio de sucesivos impulsos en el espacio temporal aminora ambos efectos. La figura 6 muestra las formas promedio para cinco petardos de cada uno de los tipos indicados.

Las formas temporales de los impulsos (firmas) difieren de las se obtienen según el esquema de cálculo propuesto por Brode (11) para grandes cargas explosivas y de los modelos aproximados de Reed (12), principalmente en la parte negativa del impulso que es netamente de mayor amplitud. Por otra parte muestran muy buena concordancia con los resultados obtenidos con el modelo de Sedov (9), considerado para descargas de condensadores eléctricos por Wyber (13).

El cálculo de la firma mediante el modelo de Weber, tal como se ha indicado precedentemente, proporciona, paradójicamente, un resultado con el tiempo invertido de signo respecto a los resultados

\* Este efecto es tanto más patente cuanto mayor es la masa explosiva, que parece lógico pues en todos los casos la clase, longitud y disposición de la resistencia de ignición fueron análogas.

experimentales, lo que equivaldría a variar la fase de las ondas componentes. Tras hacer dicho cambio, el resultado es bastante concordante con los resultados experimentales, si bien la parte de presión negativa, al igual que en los modelos citados de Brode y Reed, es de bastante menor amplitud. Ver figura 5. Esto se traduce, como veremos más adelante, en una variación del espectro para frecuencias superiores a la del máximo: el espectro, en doble escala logarítmica, por bandas de ancho lineal constante, no es simétrico ni posee una asíntota en altas frecuencias común a todas las explosiones.

La parte negativa del impulso no puede, por tanto, tener una forma arbitraria. Las leyes de similitud obligan a que sea de una manera determinada y no de otra, y en los rangos experimentados hemos comprobado que esto es así. Parecen, por tanto, infructuosos desde el punto de vista real, y sólo valen como especulación, los estudios por simulación de algunos autores para buscar la forma óptima de impulsos para la medida del aislamiento acústico (5) o de la propagación cerca del suelo de impulso (14).

La relación entre la energía de la parte positiva y de la negativa del impulso, calculadas a partir de las experiencias realizadas, es ligeramente superior a 1 para las masas explosivas más bajas, disminuyendo lentamente hasta un valor algo menor que 1 para 6 gr. Interpretamos esto último como debido a una ligera "saturación con deriva" producida en la adquisición de datos para las señales más intensas. Este efecto no tiene importancia en los restantes análisis efectuados. Parece razonable que nunca sea superior a 1.

Los espectros promedio de las cargas explosivas de 0.5, 2, 3.2 y 6.1 gr. aparecen en la figura 7, expresados en niveles relativos por bandas de ancho lineal constante. En todos los casos se mantiene bastante bien la asíntota inferior (rama ascendente) con una pendiente de 6 dB al duplicar la frecuencia. Después de alcanzar el máximo comienza una zona de caída a razón de -12 dB cada vez que se duplica la frecuencia, que se extiende hasta una frecuencia algo superior a dos veces la frecuencia del máximo. A partir de entonces, la caída es, de nuevo, sensiblemente constante a razón de -6 dB/octava. Estas ramas descendientes finales se sitúan a distinta altura para las distintas cargas. Los tramos de caída a razón de 12 dB/octava indican la posibilidad de alinearse en una misma recta para todas las masas explosivas. Los máximos están en consonancia con el modelo de Sedov indicado tal como lo presenta Wyber (13).

La energía acústica total producida por estas explosiones, calculada en el espacio temporal, va-

ría en función de la masa explosiva a razón de 3 dB cada vez que se duplica la masa. En el intervalo de masas indicado, quiere esto decir que para esta clase de explosivo (habitual en pirotecnia, cuya fórmula no nos fue facilitada), geometría y forma de ignición usados, el factor de conversión o rendimiento permanece constante. La figura 8 recoge los resultados para la primera serie de petardos (5 unidades de cada una de las cinco masas). Únicamente los de masa 1 gr. elaborados por nosotros se apartan de la relación lineal, indicando claramente la diferencia de nuestra manufactura. (También obtuvimos diferencias en la forma temporal y espectro respecto a lo que cabía esperar para esa masa, paraciéndose más a los de 2 gr. de la serie manufacturada por los pirotécnicos suministradores).

En la misma figura 8 se ha representado la variación de la frecuencia del máximo espectral en función de la masa explosiva. Esta figura 8 en su conjunto permite caracterizar completamente a efectos acústicos cada tipo de petardo: sitúa los niveles y la posición del máximo en función de la masa. A cada tipo de explosivo y manufactura le corresponde una pareja de curvas  $E(m)$ ,  $f_{max}(m)$ , permitiendo elegir la más adecuada a cada aplicación concreta.

En estudios de aislamiento acústico, resulta más conveniente trabajar con espectros expresados en bandas de ancho logarítmico constante y más concretamente en bandas de tercio de octava. A tal efecto, un sencillo algoritmo permite hacer el paso a esta representación a partir del espectro por bandas de ancho lineal constante si se admite la incoherencia entre las señales de las distintas bandas. En este sentido, resulta muy útil saber que un tramo recto de pendiente  $n$  dB/octava cambia a otro tramo, también recto, de pendiente  $n+3$  dB/octava.

Hemos obtenido, del modo indicado, valores próximos a 9 dB/octava para las ramas ascendentes, concordantes con los resultados de Schomer (15), y Roland (5). A partir del máximo espectral y durante una octava varía el espectro en -7.5 dB/octava para, a partir de ahí, hacerlo a razón de 2.5 dB/octava.

La inclusión de una red eléctrica de ponderación en el circuito de captación a fin de obtener los índices globales RA o RW del aislamiento acústico a ruido aéreo requiere la invarianza o repetitividad del espectro: dentro de ciertas tolerancias, debe mantenerse la forma del espectro para las mismas cargas norminales. (Al tratarse de una valoración del aislamiento el nivel absoluto no tiene importancia, pues se compensa por diferencia. Sin embargo, desde el punto de vista experimental, el nivel es importante, pues en todo caso

debe estar por encima del ruido de fondo). A fin de estudiar este efecto hemos obtenido los espectros de 23 explosiones producidas con petardos de carga nominal, 0.5 gr. e igual manufactura, para diferentes condiciones de absorción, posición del punto de observación y volumen del recinto:

- 5 casos en un recinto de 50 m<sup>3</sup> con la misma distancia de 1.4 m. entre fuente y receptor para cinco condiciones de absorción en las proporciones 1:4:8:12:16.

- 9 casos en un recinto de 100 m<sup>3</sup>, de los cuales 5 corresponden a una distancia emisor-receptor de 4 m. para condiciones de absorción relativa 1:4:8:12:16, aproximadamente, y 4 para igual absorción (recinto sin absorción adicional) a distancias variables entre 4.5 y 1.2 m. (una de estas posiciones está contabilizada también entre las cinco precedentes). En el apartado 3 de condiciones experimentales se indican las posiciones concretas de fuente y micrófono.

Los espectros por bandas de tercio de octava obtenidos se han ajustado en nivel medio: se han restado los valores medios respectivos, de los valores particulares. De este modo, todos quedan referidos a un mismo valor, siendo comparables, ya que nos interesamos solamente en su forma. Sobre la población de espectros resultante, hemos calculado el espectro medio y la desviación standard. Aparecen representados en la figura 9. Observamos que la repetitividad es, en promedio, mejor que 0.6 dB en las bandas de 100 Hz a 1000 Hz, y aumenta a 1.5 dB entre 1000 Hz y 6000 Hz. Estas desviaciones producirían variaciones en los índices de valoración global RA y RW no superiores a 1 dB que es un valor muy razonable en medidas de control y augura muy buenas perspectivas para su aplicación a la medida directa del aislamiento global.

Cuando se estudia el espectro de la señal completa (señal directa + reflexiones) con la posición de captación, se aprecian variaciones que, de acuerdo con nuestras observaciones ciertamente

restringidas, pueden resumirse en un aumento de la dispersión que se acentúa tanto más cuanto más baja es la frecuencia. El efecto de la absorción equivalente, para los casos experimentados por nosotros con absorbentes adicionales, bastante planos en la banda de frecuencias de interés, queda enmascarado en el efecto de la posición del micrófono indicado.

## Conclusiones

Hemos confirmado, en este trabajo, que los impulsos acústicos producidos por cargas explosivas de las usadas habitualmente en pirotecnia, activadas mediante fusión en pequeñas resistencias, cumplen satisfactoriamente las leyes de similitud de explosiones, quedando reducidos a un plano muy secundario los efectos de no simultaneidad completa de la explosión.

La repetitividad de la forma de los espectros de estas fuentes de ruido es suficientemente buena como para sustentar firmemente el uso de circuitos eléctricos de ponderación en el instrumental de medida, permitiendo obtener experimentalmente y de modo directo, los valores de los índices RA o RW (dependiendo del circuito ponderado), exigidos respectivamente por las normas NBE-CA-82 del MOPU e ISO-717.

Las características esperables a priori de la cuantía y forma de las curvas de aislamiento a medir aconsejan usar cargas explosivas que produzcan un máximo en la banda de 630-800 Hz, lo que significa, para explosivos y manufacturas usuales en pirotecnia, masas del orden de 0.5 gr. Cada explosivo queda suficientemente caracterizado por la recta, que, en representación doble logarítmica, relaciona la frecuencia de situación del máximo con la masa explosiva.

AGRADECIMIENTOS. Este trabajo es parte del proyecto PR-84-0018 financiado por la C.A.I.C.Y.T.

## Bibliografía

(1) A.C. Raes. *La technique des travaux*. 3-4 (1959).

(2) S. Ingemasson. *Repport R49* (1972), citado en 5.

(3) P. de Tricaud. *Impulse techniques for the simplification of the insulation measurement between dwellings*. *Applied Acoustics* 8 (1975) 245-256.

(4) L. Sánchez Pina, A. Moreno. Fuente acústica impulsiva de espectro controlable. *Revista de Acústica*, vol. XVI (1985) 101-103.- L. Sánchez, A. Moreno, J.

Pfretschner. *12-ICA Toronto* (1987), vol. 3, L2-10.

(5) 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 P. No. 380* (1980) 47-67.

(6) A. Moreno. The dependence of RW on the shape of the transmission loss curve. Towards a definitive understanding of the correlation between RW and RA. *J. Sound Vib.* 117, 3 (1987) 543-553.

- (7) W. Weber. The sound spectra of condenser discharges and pistol reports and applications in electroacoustic measurements. *Akustische Zeits* 4 (1939) 373. (Review de L.L.Beranek en *J. Acoust. Soc. Am* 12 (1940) 210-213.
- (8) G.F. Kinney, K.J. Graham. *Explosive shocks in air*. Springer-Verlag, New York 1985. Cap. 7.
- (9) L.J. Sedov. *Similarity and dimensional methods in mechanics*. Academy Press, New York 1959.
- (10) W.E. Baker. *Explosions in air*. University of Texas Press, Austin (1973).
- (11) H.L. Brode. Numerical solutions of spherical blast waves. *J. Applied Phys*, 26, 6 (1955) 766-775.
- (12) J. W. Reed. Atmospheric attenuation of explosion waves. *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 1 (1977) 39-47.
- (13) R. J. Wyber. The design of a spark discharge acoustic impulse generator. *IEEE T. Acoust., Speech. Sig. Proc.* 23, 2 (1975) 157-162.
- (14) C.G. Don, A.J. Cramon. Impulse propagation in a neutral atmosphere. *J. Acoust. Soc. Am.* 81, 5 (1987) 1341-1348.
- (15) P. D. Schomer, R.J. Goff, L.M. Little, Statistics of amplitude and spectrum of blast propagated in the atmosphere. *J. Acoust. Soc. Am.* 63, 5 (1978) 1431-1443.

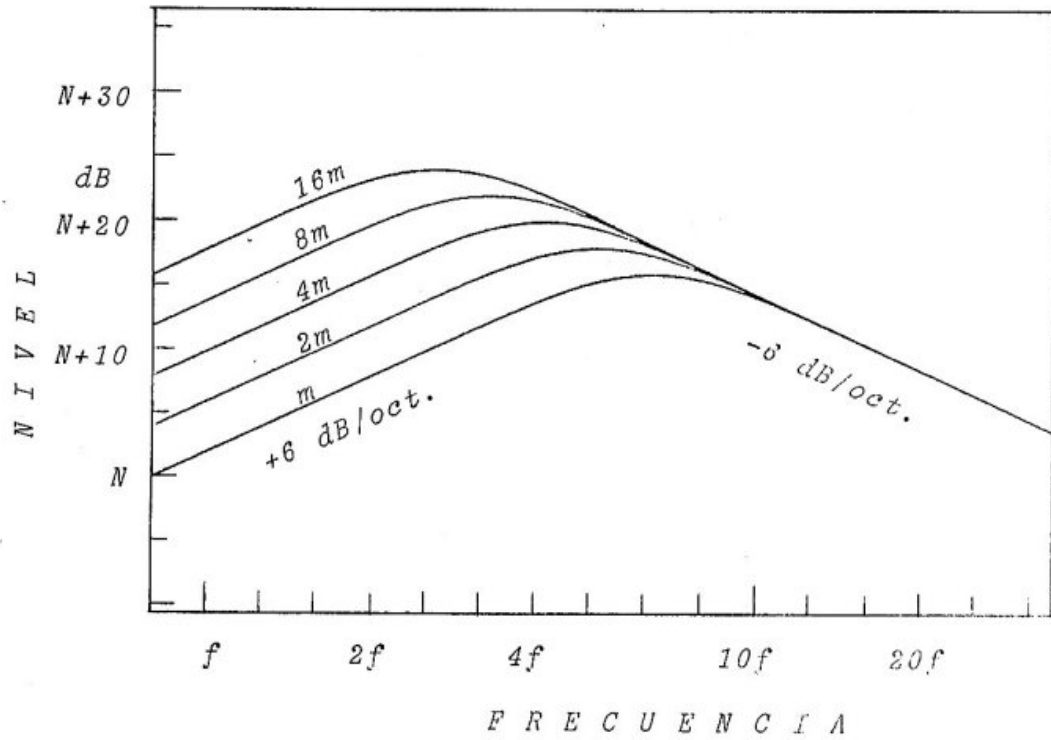


Figura 1. Asíntotas en bajas y altas frecuencias del espectro acústico de explosiones para bandas de frecuencia de ancho lineal constante.

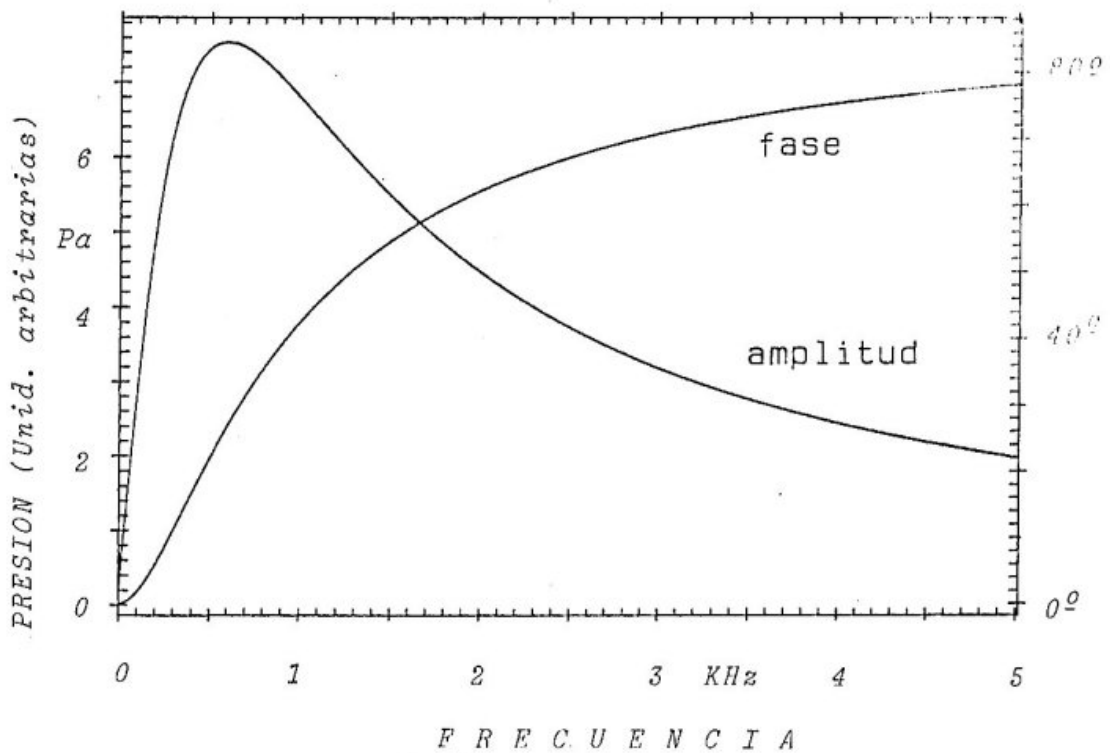


Figura 2. Amplitud y fase de las componentes espectrales para una explosión cuya esfera inicial asociada tiene un radio de 142 mm., según la teoría de Weber.

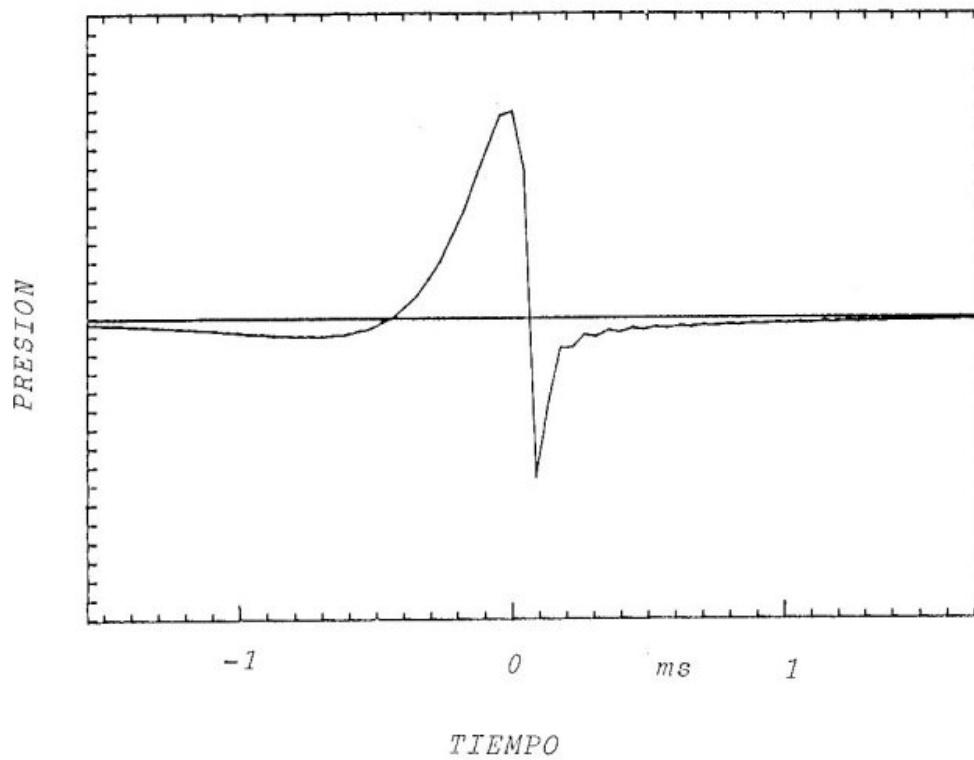


Figura 3. Forma temporal del impulso correspondiente a los datos de la figura 2, calculada por FFT inversa. (Ver texto).

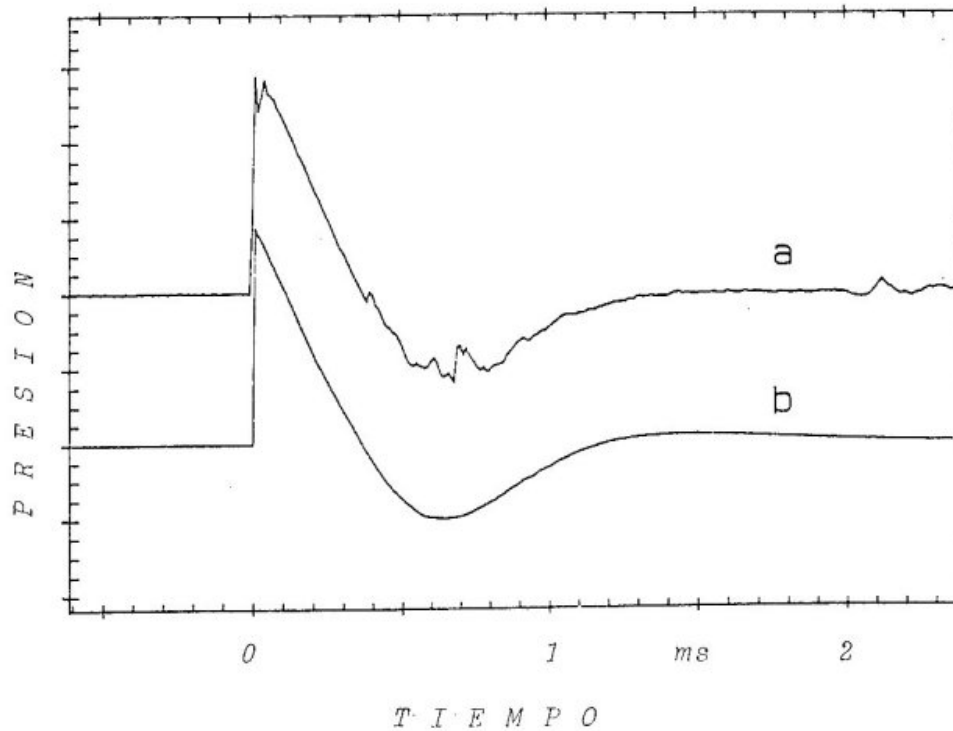


Figura 4. Forma temporal típica de un impulso acústico producido por explosión de una masa de pólvora de 0.5 gr. a) Impulso individual; b) promedio de cinco impulsos con alisado suplementario.



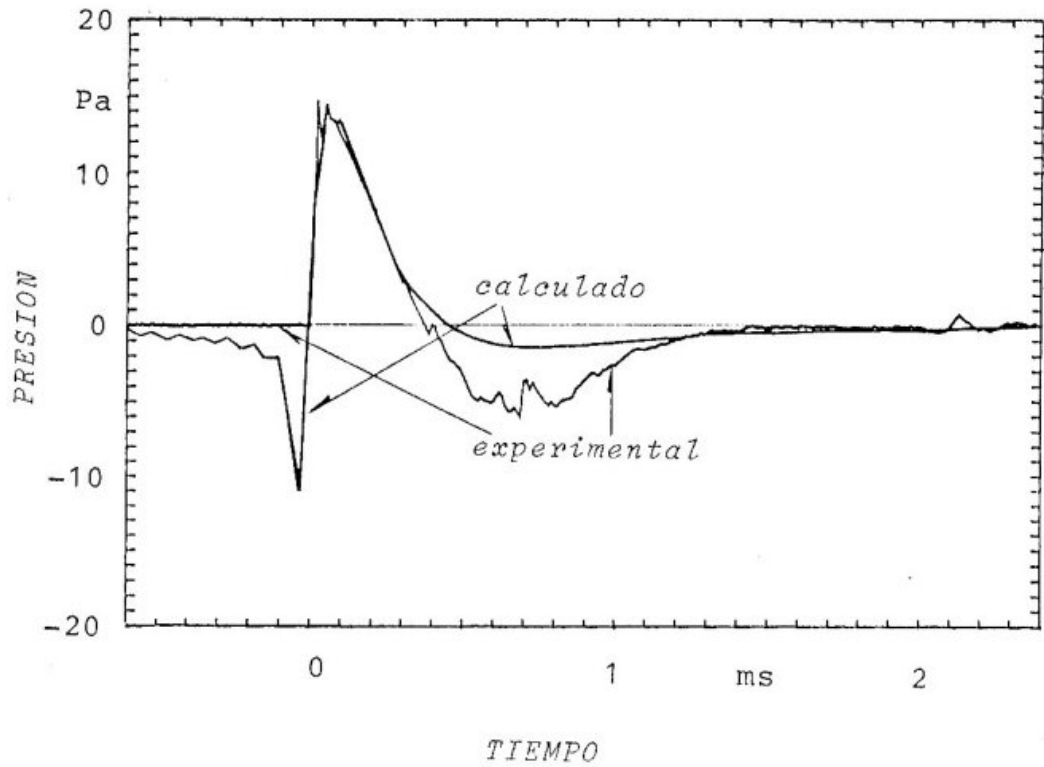


Figura 5. Forma temporal de impulsos, experimental y calculado por la teoría de Weber, para los casos de las figuras 2 y 4. (Ver texto).

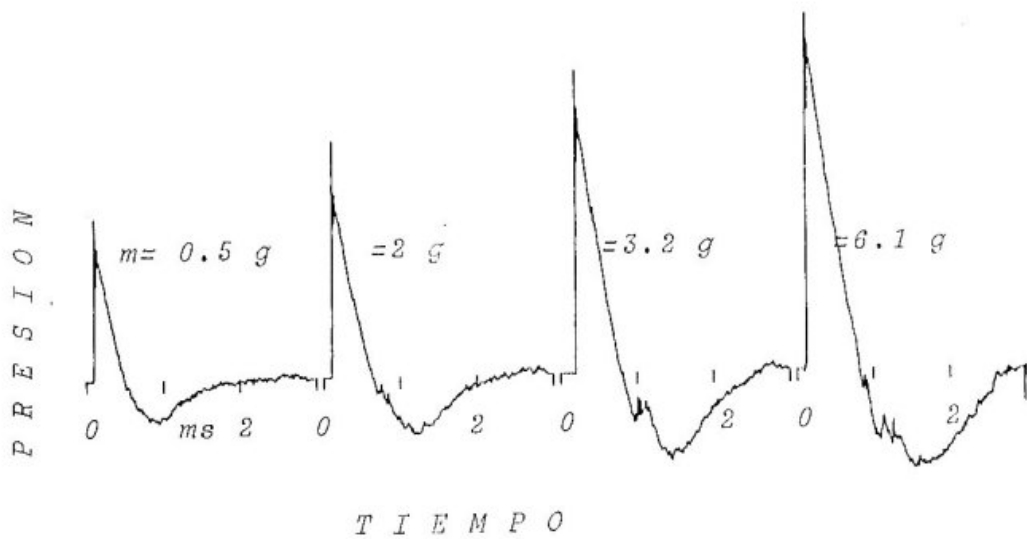


Figura 6. Formas temporales promedio de los impulsos experimentales obtenidos para masas explosivas de 0.5, 2, 3.2 y 6.1 gr.

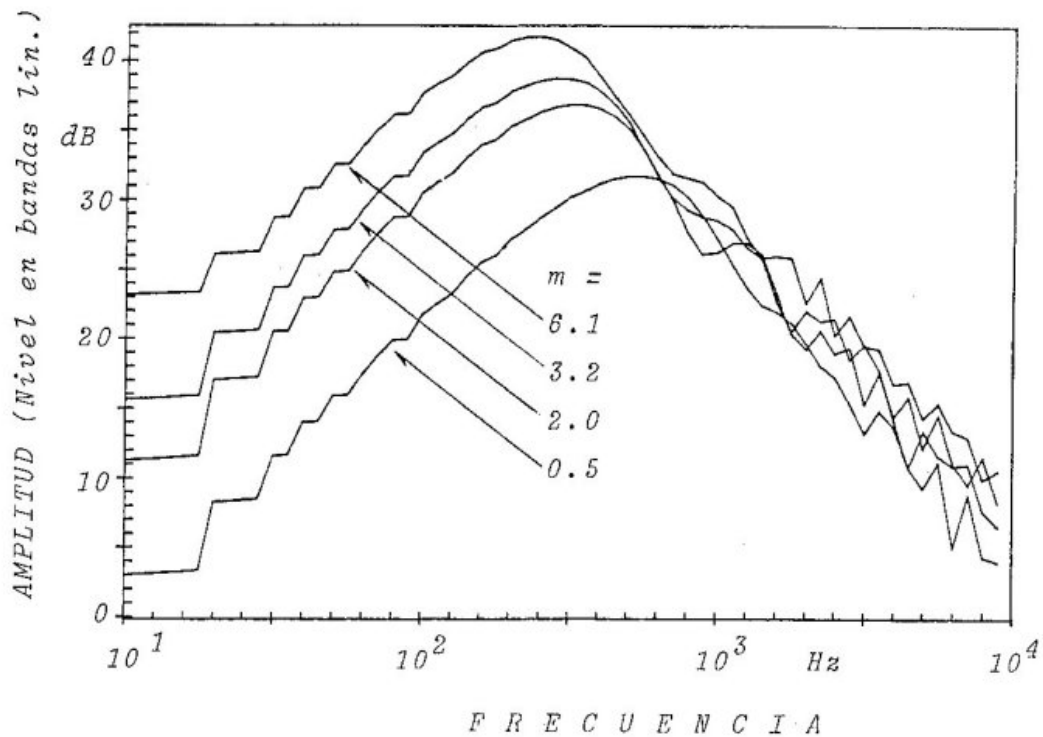


Figura 7. Espectros de los impulsos experimentales indicados en la figura 6, para bandas de frecuencia de ancho constante.

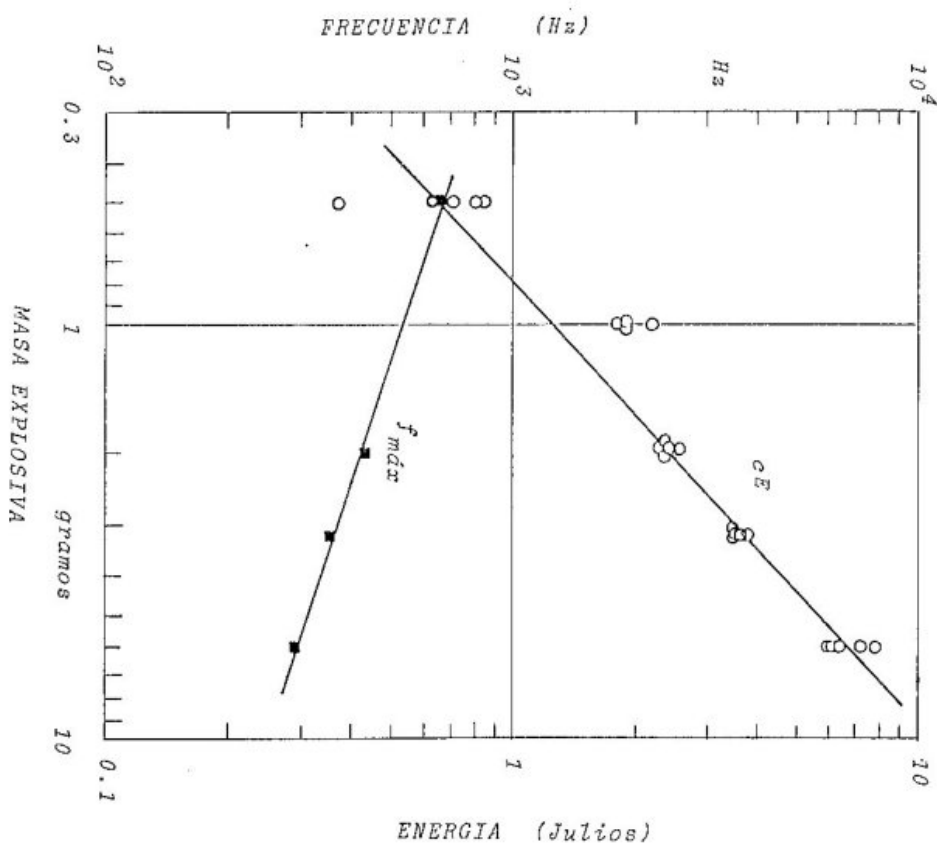


Figura 8. Variación de la energía acústica y de la frecuencia del máximo espectral de impulsos en función de la masa explosiva.

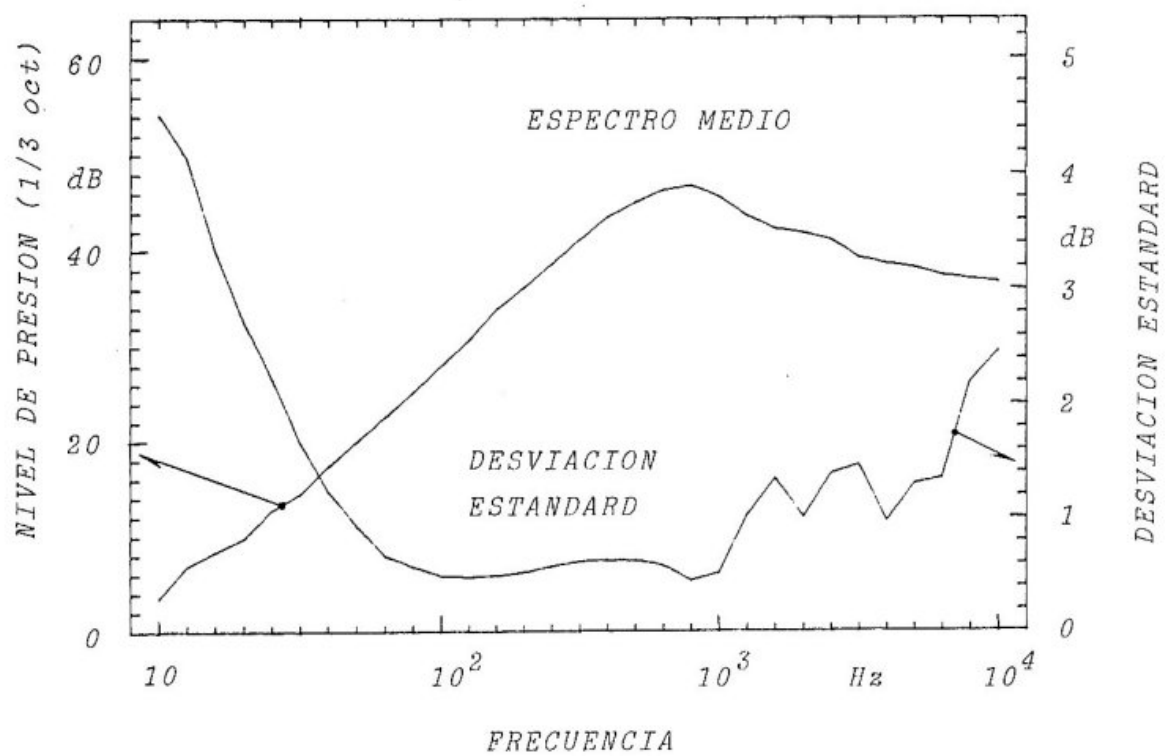


Figura 9. Espectro, por tercios de octava, de los impulsos acústicos obtenidos con masas explosivas de 0.5 gr. para distintas condiciones. Valor medio y desviación standard.